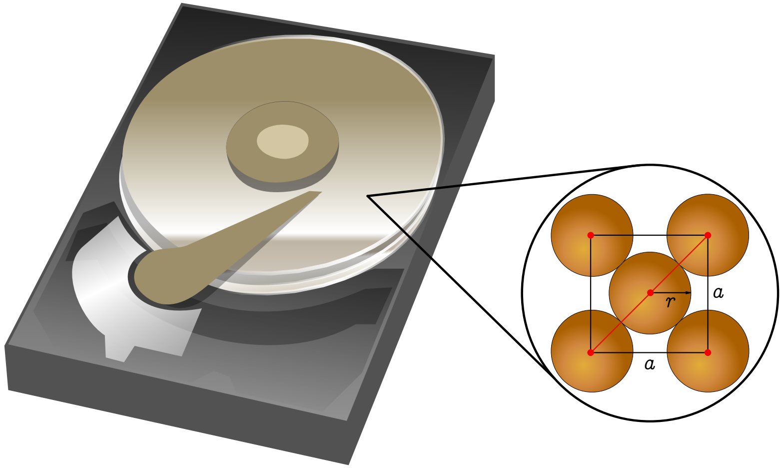
Ю. А. Гатчин
В. Л. Ткалич
П. А. Камаев
Д. Д. Симаков
Е. Д. Хмелев

Материалы электронных средств



Санкт-Петербург
2010

Редакционно-издательский отдел
Санкт-Петербургского государственного
университета информационных технологий,
механики и оптики
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

Гатчин Ю. А., Ткалич В. Л., Камаев П. А., Симаков Д. Д., Хмелёв Е. Д.

Материалы электронных средств

Учебное пособие

Санкт-Петербург
2010

УДК 621.3:[621.315.5 + 621.315.6] + 538.9

Гатчин Ю. А., Ткалич В. Л., Камаев П. А., Симаков Д. Д., Хмелёв Е. Д. «Материалы электронных средств». Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. 112 с.

В учебном пособии рассмотрены элементы кристаллофизики, а также основные виды проводниковых, полупроводниковых и диэлектрических материалов электронных средств.

Предназначено для студентов и магистров факультетов КТиУ и ТМиТ, изучающих дисциплины «Физические основы микроэлектроники», «Материаловедение и материалы электронных средств»: направления 210202 — «Проектирование и технология электронно-вычислительных средств» для специалистов и 210200.05 — «Информационные технологии проектирования электронных средств» для магистров техники и технологии, а также 200100 и 200101 — «Приборостроение» для бакалавров и дипломированных специалистов.

Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по образованию в области приборостроения и оптотехники для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 200100 — Приборостроение и специальности 200101 — Приборостроение (решение УМО по образованию в области приборостроения и оптотехники от 29.04.10, протокол № 3).

Печатается по решению Совета факультета КТиУ СПбГУ ИТМО от 13.04.10 (протокол № 9) и решению Совета факультета ТМиТ СПбГУ ИТМО от 13.04.10 (протокол № 7).

В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена Программа развития государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики» на 2009–2018 годы.

© Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2010

© Гатчин Ю. А., Ткалич В. Л., Камаев П. А., Симаков Д. Д., Хмелёв Е. Д., 2010

Оглавление

Введение **5**

1 Элементы кристаллофизики **7**
- 1.1 Химическая связь в кристаллах 7
- 1.2 Геометрия кристаллической решетки 11
- 1.3 Дефекты структуры кристаллов 17
- 1.4 Аморфные твердые тела 24

2 Проводниковые материалы **28**
- 2.1 Общие сведения о проводниках 28
- 2.2 Медь 29
- 2.3 Алюминий 30
- 2.4 Никель 31
- 2.5 Хром 32
- 2.6 Золото 33
- 2.7 Серебро 33
- 2.8 Платина 34
- 2.9 Палладий 35
- 2.10 Сравнение проводников 35

3 Полупроводниковые материалы **37**
- 3.1 Основные понятия 37
- 3.2 Простые полупроводники 40
  - 3.2.1 Кремний 40
  - 3.2.2 Германий 43
- 3.3 Двойные полупроводниковые фазы 46
  - 3.3.1 Соединения типа $A^{III}B^{V}$ 46
  - 3.3.2 Полупроводниковые сверхрешетки 48
  - 3.3.3 Соединения типа $A^{II}B^{VI}$ 50

3.3.4 Соединения типа $A^{IV}B^{VI}$ 51
3.3.5 Карбид кремния 52
3.4 Очистка и получение монокристаллов 52
3.5 Легирование полупроводников 54
3.6 Методы получения тонких пленок 57

4 Диэлектрические материалы 62
4.1 Основные понятия о диэлектриках 62
4.1.1 Поляризация диэлектриков 62
4.1.2 Токи смещения, электропроводность 66
4.1.3 Диэлектрические потери 67
4.2 Пассивные полимеры 69
4.2.1 Основные сведения о полимерах 69
4.2.2 Линейные полимеры 72
4.2.3 Порошковые пластмассы 72
4.2.4 Электроизоляционные компаунды 73
4.2.5 Неорганические стекла 75
4.2.6 Ситаллы 78
4.2.7 Керамика 79
4.3 Активные диэлектрики 83
4.3.1 Сегнетоэлектрики 83
4.3.2 Пьезоэлектрики 85
4.3.3 Пироэлектрики 86
4.3.4 Электреты 87
4.3.5 Пористый кремний 88
4.3.6 Жидкие кристаллы 90
4.4 Тонкие диэлектрические пленки 93

А Справочные таблицы 96

Литература 106

Введение

Данное учебное пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 210202 — «Проектирование и технология электронных средств», а также для магистров по направлениям 210200.05 — «Информационные технологии проектирования электронных средств», 200100 и 200101 — «Приборостроение».

Учебное пособие может быть успешно использовано в учебном процессе целого ряда дисциплин данных направлений, таких как «Физические основы микроэлектроники», «Введение в специальность», «Материаловедение и материалы электронных средств», «Электроэлементы и передача данных в компьютерных системах» и т. д.

Электроника — наука о взаимодействии заряженных частиц (электронов, ионов) с электромагнитными полями и о методах создания электронных приборов и устройств (вакуумных, газоразрядных, полупроводниковых), используемых в основном для передачи, обработки и хранения информации[1].

Для осмысленной работы в области электроники и микроэлектроники необходимо изучать процессы, происходящие при взаимодействии электронов и других заряженных и нейтральных частиц с веществом, находящемся в любом из известных агрегатных состояний; основы физики твердого тела и физической химии; кристаллографию; науку о материалах в целом и материаловедение в частности; физику элементарных частиц и физику плазмы; физику газового разряда и ионизованных газов; электрохимию; коллоидную химию; химию ультрадисперсных частиц и многое другое и уметь применять эти знания на практике для создания реально существующих и реально действующих приборов.

[1]Большой энциклопедический словарь. — М.: Сов. энцикл., 1991.

В первой главе рассмотрены основные элементы кристаллофизики, включая химические связи и геометрию кристаллической решетки, а также дефекты кристаллических структур и особенности аморфных твердых тел.

Вторая глава посвящена проводниковым материалам. Приведены общие сведения общие сведения о проводниках, рассмотрены такие материалы как медь, алюминий, никель, хром, золото, серебро, платина и палладий, дана их сравнительная характеристика.

Третья глава посвящена полупроводниковым материалам. В ней рассмотрены основные понятия, а также простые проводники и двойные проводниковые фазы. Уделено внимание вопросам очистки и получения монокристаллов, легирование полупроводников и методам получения тонких пленок.

В четвертой главе осуществлено рассмотрение основных диэлектрических материалов электронных средств (порошковых пластмасс, электроизоляционных компаундов, неорганических стекол, ситаллов, керамики, сегнетоэлектриков, пьезоэлектриков, пироэлектриков, электретов, пористому кремнию и нитриду кремния). Уделено внимание рассмотрению ряда вопросов: поляризации диэлектриков, токам смещения, электропроводности и диэлектрическим потерям.

В приложении приведены сводные таблицы физико-химических свойств основных материалов электронных средств.

Глава 1

Элементы кристаллофизики

1.1 Химическая связь в кристаллах

В твердых телах между частицами действуют различные по своей природе силы, удерживающие эти частицы на определенных расстояниях друг от друга. Удаленные на бесконечно большое расстояние, т. е. изолированные атомы не испытывают сил взаимодействия. Однако при уменьшении расстояния $r_{\text{а}}$ между ними возникают силы взаимодействия: притяжение — при больших $r_{\text{а}}$, и отталкивание — при существенно малых $r_{\text{а}}$. В зависимости от преобладающего вида взаимодействия атомов их суммарная потенциальная энергия (рис. 1.1) может быть выражена:

$$U_{\text{а}} = \frac{\alpha}{r_{\text{а}}^n} + \frac{\beta}{r_{\text{а}}^m}, \tag{1.1}$$

где α и β — постоянные, характеризующие вид взаимодействия (притяжение или отталкивание), n и m — постоянные числа, относящиеся к рассматриваемому виду взаимодействия.

При некотором r_0 наступает равновесие сил. Это означает, что образовавшаяся молекула имеет минимальную энергию взаимодействующих атомов; расстояние r_0 называется длиной валентной связи. Обычно r_0 составляет 1–2 Å. Сущность теории валентных связей заключается в том, что рассматривается обменное взаи-

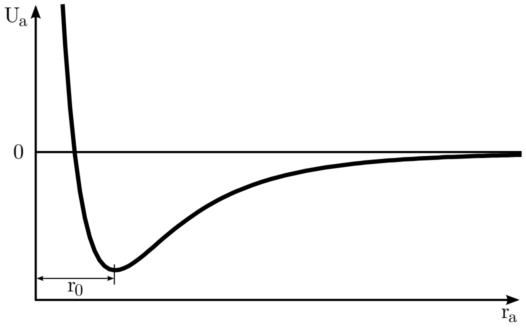


Рис. 1.1. Энергия взаимодействия атомов

модействие нескольких электронов соседних атомов. Обменное взаимодействие вследствие неразличимости электронов означает, что электроны соседних атомов могут обмениваться местами, осуществляя связь между атомами. При образовании конденсированной фазы происходит перераспределение валентных электронов и возникает химическая связь, которая характеризуется энергией, длиной, кратностью связи и величиной углов между направлениями связи.

Под энергией связи понимается величина энергии, выделяемая при образовании молекулы из атомов, в среднем она составляет 60–80 ккал/моль. С уменьшением длины связи энергия ее возрастает. Кратность связи характеризуется количеством электронных пар, участвующих в образовании молекулы. Увеличение кратности связи приводит к возрастанию ее энергии.

Геометрическая конфигурация молекул, содержащих больше двух атомов определяется взаимным расположением орбиталей, образующих направленные химические связи. Для определения конфигурации молекул пользуются величиной углов между связями.

Различают следующие виды связи между частицами:

- ионная, обусловленная электростатическим взаимодействием разноименно заряженных ионов;
- ковалентная, обусловленная взаимодействием атомов, при котором происходит обобществление валентных электронов с противоположными спинами;

- ван-дер-ваальсова, обусловленная поляризационным эффектом полей движущихся электронов взаимодействующих атомов;
- металлическая, обусловленная взаимодействием между положительно заряженными ионами решетки кристалла и окружающими их свободно движущимися электронами.

Обычно в конденсированных фазах одновременно проявляется действие нескольких видов связи [1].

Рассмотрим основные виды химической связи.

Ионная связь. Кристаллы, в которых обнаруживается ионный характер связи между частицами, содержат атомы, электронная оболочка которых при обмене электронами стремится к стабильной конфигурации оболочки инертных газов. Энергия решетки ионных кристаллов описывается выражением

$$U = -\frac{A\,Z_1\,Z_2\,e^2}{r} + \frac{B}{r^n}, \tag{1.2}$$

где A — постоянная Маделунга, зависящая от координационного числа и типа кристаллической структуры, r — расстояние между ближайшими соседними ионами, Z_1 и Z_2 — их заряды, B и n — величины, постоянные для данного химического соединения [2].

Здесь первый член относится к составляющей энергии, вызванной силами притяжения, второй — к составляющей энергии, вызванной силами отталкивания.

В ионных кристаллах из-за сильного электростатического взаимодействия обнаруживается высокая прочность межатомных связей, вследствие чего они отличаются высокой температурой плавления, малым коэффициентом теплового расширения (ТКР), высокой теплопроводностью и твердостью, низкой электропроводностью. В кристаллах чистых элементов ионная связь не наблюдается [1].

Ковалентная связь. Кристаллы, в которых существует ковалентная связь между частицами, содержат атомы, у которых возможно обменное взаимодействие валентных электронов с противоположно ориентированными спинами. Обобществленные электроны одновременно принадлежат всем взаимодействующим атомам, однако ни с одним из них они не связаны. При обобществлении двух электронов образуется одинарная связь. Например при

образовании молекулы Cl_2 имеем:

$$\mathrm{Cl}\cdot + \cdot\mathrm{Cl} \to \mathrm{Cl}\!:\!\mathrm{Cl}.$$

Здесь каждый атом обобществляет только один электрон и образуется единичная ковалентная связь, причем спаренные электроны имеют противоположные спины. Однако возможны взаимодействия с большей кратностью связи, когда образуются двойные, тройные, и четырехкратные ковалентные связи с обобществлением соответственно четырех, шести и восьми электронов.

Для ковалентных связей характерна пространственная насыщенность и направленность связей. Кристаллы с ковалентной связью отличаются высокими температурой плавления и твердостью и низкой электропроводностью [1].

Ван-дер-ваальсова связь. Силы этого вида связи являются довольно слабыми силами электростатического притяжения диполей; длина связи и энергия примерно одинаковы в пределах координационной сферы. Сущность ван-дер-ваальсовых сил связи состоит в том, что электрическое поле электронов, вращающихся вокруг ядра атома, воздействует на движение электронов соседнего атома. При этом происходит мгновенная взаимная поляризация электронных орбит с образованием диполей, электростатическое взаимодействие которых вызывает ориентационные и индукционные эффекты, осуществляющие связь в твердом теле. Энергия кристаллической решетки, вызванная наличием этих сил:

$$\Delta U = -\hbar\,\omega_0\,\frac{a^2}{2\,r^6} = -\frac{a}{r^6}, \qquad (1.3)$$

где ω_0 — собственная частота простого гармонического осциллятора, a — поляризуемость осциллятора (атома) [2]. С увеличением объема атома и количества валентных электронов силы связи возрастают. Подобные силы взаимодействия существуют в любых кристаллах, однако их вклад в суммарную величину сил взаимодействия атомов различен и для большинства веществ очень мал.

Твердые тела с ван-дер-ваальсовой связью между атомами являются хорошими изоляторами, они имеют низкую прочность и температуру плавления [1].

Металлическая связь. Этот вид связи относится к нелокализованной химической связи и свойственен только металлам, где ионы образуют остов кристаллической решетки, внутри ко-

торой свободно перемещаются электроны, равномерно заполняющие весь кристалл.

Для металлов характерны высокие значения электроотрицательности и теплопроводности, что объясняется свободным перемещением электронов в кристалле (подобно молекулам газа). Силы притяжения между ионами решетки и «газом» электронов обуславливают устойчивость систем в целом и являются силами металлической связи. Поскольку связь не носит направленный характер, то расположение ионов в решетке приближается к плотной упаковке шаров. Металлическая связь является ненасыщенной.

Характер и величина сил связи определяет реакционную способность тел, их микротвердость, теплопроводность и другие физические свойства [1].

1.2 Геометрия кристаллической решетки

Кристаллами называются тела, ограниченные в пространстве плоскими поверхностями — гранями. Характерной особенностью кристаллического состояния является наличие трехмерного строго периодического расположения в пространстве атомов, образующих *кристаллическую решетку*. Одиночные кристаллы (размером 10 мкм и более) с визуально различными гранями, проявляющие анизотропию физических свойств, называются *монокристаллами*. Такие кристаллы иногда достигают размера до 1 м.

Значительно чаще встречаются твердые тела, состоящие из множества мелких (от 10^{-3} до 10 мкм) кристаллов, ориентированных друг относительно друга хаотично. Физические свойства таких тел изотропны и они называются *поликристаллами*.

Физические свойства тел тесно связаны с их кристаллическим строением, а некоторые свойства обнаруживают зависимость от кристаллографических направлений. Зависимость физических свойств кристаллов от кристаллографических направлений называется *анизотропией*. К таким свойствам относятся удельное электрическое сопротивление, коэффициент теплового расширения, модуль Юнга и др. Поэтому при создании приборов высокие требования предъявляются к пространственной ориентации направлений «реза» кристаллических слитков на пластины и поверхности монокристаллических подложек.

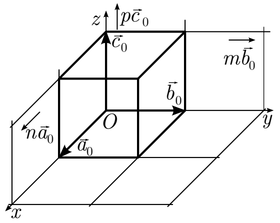


Рис. 1.2. Элементарная ячейка

Закономерность распределения атомов в идеальных кристаллах определяется размером ионов и характером сил их взаимодействия. Остановимся на рассмотрении ионов геометрической кристаллографии.

Точки пространства, где силы притяжения и отталкивания уравновешиваются (рис. 1.1), называются *узлами кристаллической решетки*. Положение любой частицы в такой структуре описывается вектором

$$\vec{r} = m\,\vec{a}_0 + n\,\vec{b}_0 + p\,\vec{c}_0, \tag{1.4}$$

где векторы $\vec{a}_0$, $\vec{b}_0$, $\vec{c}_0$ — кратчайшие расстояния между частицами — являются тремя некомпланарными векторами; m, n и p — произвольные целые числа.

Заметим, что перемещение элементарного кристалла параллельно самому себе на любой из векторов $\vec{a}_0$, $\vec{b}_0$ и $\vec{c}_0$ приводит к совмещению узлов кристаллической решетки и называется *трансляцией*. Параллелепипед, построенный на кратчайших расстояниях a_0, b_0, c_0 называется *трансляционной ячейкой*, представляющей собой элементарную ячейку наименьшего объема. Пере-

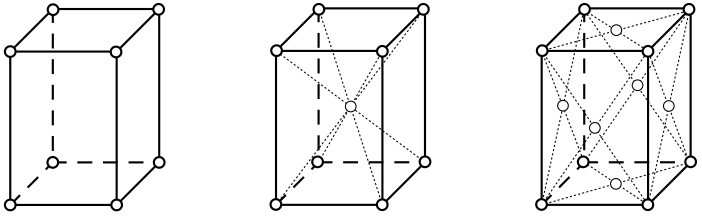


Рис. 1.3. Типы решеток

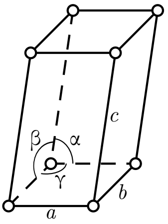


Рис. 1.4. Кристалл в общем виде

мещением элементарной ячейки в пространстве можно построить кристалл (рис. 1.2).

Если на элементарную ячейку приходится один атом (рис. 1.3), то такая ячейка называется *примитивной*, или P-решеткой. У нее заняты только угловые позиции. Если на элементарную ячейку приходится больше одного атома, то она называется *сложной*. Например I-решетка, в центре которой расположен еще один атом (объемноцентрированная), или F-решетка, содержащая в углах и в центре граней по одному атому (гранецентрированная). В общем виде углы между гранями элементарной ячейки могут отличаться от прямых, а размеры ребер могут быть различными (рис. 1.4) [1].

О. Браве установил, что все известные кристаллы в зависимости от величины и взаимной ориентации ребер элементарной ячейки могут быть подразделены на 14 типов трансляционных решеток, образующих шесть *сингоний*[1] (табл. 1.1) [2]. Совокупность эквивалентных атомов, т. е. одинаковых атомов, одинаково расположенных, которые можно совместить путем трансляции, образуют *решетку Браве*.

Таким образом, сложную структуру кристалла можно рассматривать состоящей из нескольких вставленных друг в друга и соответственно смещенных решеток Браве.

Для описания положения атомов в кристаллической решетке, определения кристаллографических плоскостей и ориентации кристаллографических осей пользуются *кристаллографическими символами*. Координаты (x, y, z) любого узла кристаллической ре-

[1] Иногда вместо понятия «сингония» используется термин «кристаллическая система». Это приводит к путанице, т. к. различают семь кристаллографических систем, имеющих такие же названия, как и сингонии, однако тригональная (ромбоэдрическая) кристаллическая система относится к гексагональной сингонии, т. к. имеет такую же по форме элементарную ячейку.

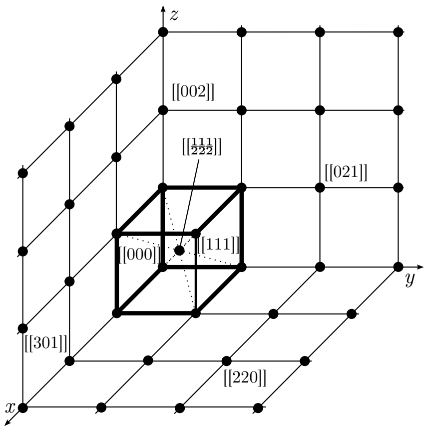


Рис. 1.5. Символы узла

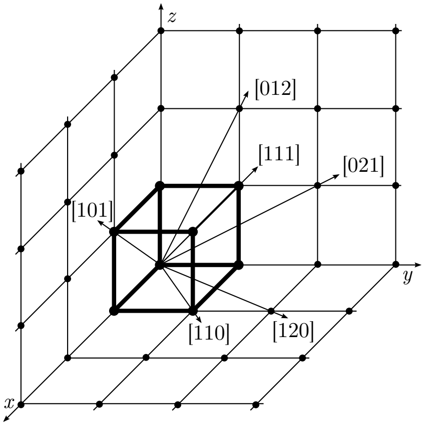


Рис. 1.6. Кристаллографические направления

шетки однозначно определяются набором трех чисел — m, n, p ($x = m\,a_0$, $y = n\,b_0$, $z = p\,c_0$) — которые называются *символами узла* и записываются в форме $[\![m\,n\,p]\!]$ В сложных решетках эти символы принимают также дробные и отрицательные значения (рис. 1.5). Черточка над числом обозначает отрицательное значение координаты, например, $[\![1\,\bar{1}\,3]\!]$. Отсчет ведется от произвольно выбранного угла, принятого за начало координатной системы.

Кристаллографические направления идентифицируются прямыми, проходящими через две точки: узел, совмещенный с условным началом координат, и ближайший узел на рассматриваемом направлении (рис. 1.6). При этом индексы ближайшего к началу

Сингония	Характеристика ячейки
Триклинная	$a \neq b \neq c$, $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$
Моноклинная	$a \neq b \neq c$, $\alpha \neq \gamma \neq 90^\circ, \beta = 90^\circ$
Ромбическая	$a \neq b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Тетрагональная	$a = b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Гексагональная	$a = b \neq c$, $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$
Кубическая	$a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

Таблица 1.1. Сингонии

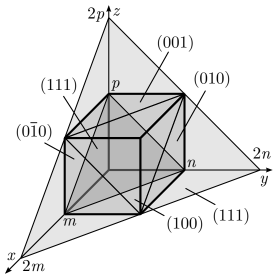


Рис. 1.7. Индексы Миллера

координат узла на этой прямой являются индексами рассматриваемого направления. Ось, проходящая через узел $[\![m\,n\,p]\!]$, ближайший на данном направлении к началу координат, обозначается как $[m\,n\,p]$-ось. Символы оси могут выражаться положительными и отрицательными числами, например ось $[1\,\bar{1}\,1]$. Обозначение „$< >$“ относится к системе эквивалентных кристаллографических направлений.

Для обозначения *кристаллографических плоскостей* пользуются *индексами Миллера* (рис. 1.7). Предположим, что некоторая плоскость отсекает на координатных осях кристаллической решетки отрезки $x = m\,a_0$, $y = n\,b_0$, $z = p\,c_0$, где m, n и p — целые числа. Представим эти целые числа в в иде обратных величин $\frac{1}{m}$, $\frac{1}{n}$, $\frac{1}{p}$ и приведем к общему знаменателю D. Тогда отношения $\frac{D}{m}$, $\frac{D}{n}$, $\frac{D}{p}$, обозначаемые числами h, k и l соответственно являются целыми числами, характеризуют положение семейства кристаллографических плоскостей и записываются в виде $(h\,k\,l)$. Числа h, k и l называются индексами Миллера и могут принимать как положительные, так и отрицательные значения. Таким образом, между целыми числами m, n и p имеется связь $h : k : l = \frac{1}{m} : \frac{1}{n} : \frac{1}{p}$.

Пример 1.1. Пусть заданы числа

$$m = \frac{1}{2}, \quad n = 2, \quad p = \frac{1}{3};$$

тогда

$$\frac{1}{m} : \frac{1}{n} : \frac{1}{p} = 2 : \frac{1}{2} : 3, D = 2,$$

и индексы Миллера принимают значения:

$$h = \frac{D}{m} = 4, \quad k = \frac{D}{n} = 1, \quad l = \frac{D}{p} = 6.$$

По индексам Миллера можно найти положение кристаллографической плоскости.

Пример 1.2. Пусть $(h\,k\,l)$ суть $(6\,4\,3)$.

Сначала находим целые числа:

$$m : n : p = \frac{1}{6} : \frac{1}{4} : \frac{1}{3} = \frac{2}{12} : \frac{3}{12} : \frac{4}{12} = 2 : 3 : 4$$

Затем определяем положение кристаллографической плоскости:

$$x = 2\,a_0, \quad y = 3\,b_0, \quad z = 4\,c_0.$$

Если грань кристалла параллельна какой-либо оси, то она пересечет ось в бесконечности, т. е. x (y или z) равен ∞, и индекс Миллера соответственно равен 0. Если грань кристалла пересекает координатную ось в отрицательном направлении, то над соответствующим индексом ставится черточка, например $(h\,\bar{k}\,l)$ для отрицательного направления по оси y. Плоскости эквивалентной симметрии обозначаются $\{h\,k\,l\}$, например $\{1\,0\,0\}$ соответствует плоскостям $(1\,0\,0)$, $(0\,1\,0)$, $(0\,0\,1)$.

Кристаллическую структуру сложного соединения можно представить, если вставить одну трансляционную решетку в другую или сместить их друг относительно друга.

Для описания свойств кристаллов удобно пользоваться представлениями о регулярно расположенных соприкасающихся шарах-ионах. В этом случае *ионный радиус* равен половине расстояния между двумя ближайшими соседями, а *относительная плотность вещества* или *упаковки* выразится как отношение суммарного объема шаров-ионов к единице объема структуры. Максимальная плотность упаковки составляет 74%, что соответствует координационному числу 12 (рис. 1.8, *а*).

Большинство полупроводников имеет *структуру ячейки алмаза*, образованную взаимным проникновением двух гранецентрированных F-решеток. В этих структурах можно выделить ионы, окруженные эквивалентно расположенными четырьмя или шестью другими ионами. Такие окружения называются соответственно тетраэдрическими (рис. 1.8, *б*) или октаэдрическими

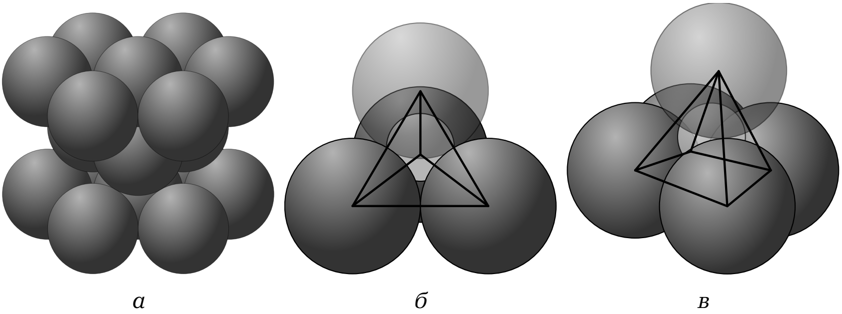


Рис. 1.8. Модели структуры кристаллов:
а — плотнейшая упаковка атомов, *б* — тетраэдрическое окружение, *в* — октоэдрическое окружение

(рис. 1.8, *в*), а междоузлии — тетраэдрическими или октаэдрическими порами. В вершинах тетраэдра или октаэдра расположены одноименные ионы, например кислород с ионным радиусом R_O. Тогда ион металла с радиусом r_m расположится в тетраэдрической поре, если

$$0{,}22 \leqslant \frac{r_m}{R_\text{O}} < 0{,}41,$$

или в октаэдрической поре, если

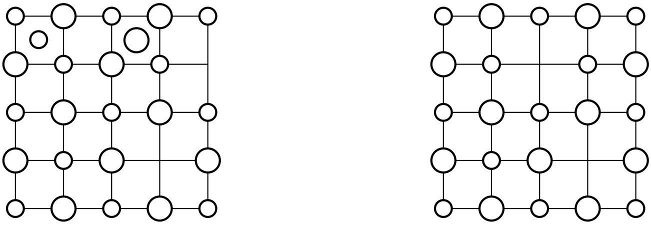
$$0{,}41 \leqslant \frac{r_m}{R_\text{O}} \leqslant 0{,}73.$$

Все рассмотренное здесь относится к идеальным кристаллам, не содержащим нарушений периодического строения и химически строго однородным [1].

1.3 Дефекты структуры кристаллов

Существенное влияние на физические свойства твердых тел оказывают дефекты кристаллического строения, которые присущи всем реальным кристаллам. Нарушения периодического расположения атомов в реальных кристаллах могут быть вызваны как химическими, так и структурными дефектами.

Сведения о дефектах кристаллической структуры в настоящее время столь обширны и разносторонни, что изложение их здесь



а *б*

Рис. 1.9. Дефекты по Френкелю (*а*) и по Шоттки (*б*)

возможно лишь в основных чертах. Структурные дефекты подразделяются на точечные, или нульмерные, линейные, или одномерные, поверхностные, или двумерные, объемные, или трехмерные [1].

Точечные дефекты. Здесь различают *дефекты по Шоттки* (вакансии), *дефекты по Френкелю* (парный дефект — вакансия и межузельный атом) и *скопление вакансий*. Точечные дефекты вызывают нарушение структуры в зоне нескольких межатомных расстояний. Наличие точечных дефектов приводит к понижению свободной энергии кристалла. Точечные дефекты в значительной мере образуются в результате термического возбуждения, т. к. фононы с большой энергией вызывают смещение ионов при их взаимодействии. При воздействии излучения с достаточной энергией появляются *радиационные нарушения* — смещенные атомы. Точечные дефекты могут возникать вследствие пластической деформации кристалла. Если в результате каких-либо внешних воздействий атом «испаряется», т. е. покидает кристалл, то образуется *вакансия* — свободный узел кристаллической решетки (обозначается V), или точечный дефект по Шоттки (рис. 1.9, *б*). Причем «испаряемый» атом может перемещаться различным образом и занимать ряд положений.

Образование дефектов связано с увеличением внутренней энергии системы и энтропии. Концентрация вакансий выражается

$$n_{\text{ш}} = N_a e^{\left(-\frac{\varepsilon_{\text{ш}}}{k\,T}\right)},$$

где N_a — количество атомов в граммоле, $\varepsilon_{\text{ш}}$ — энергия образования одной вакансии, k — постоянная Больцмана, T — температура.

Пример 1.3. Для алюминия $\varepsilon_{\text{ш}} = 0{,}75$ эВ, и при $T = 300$ К находим $n_{\text{ш}} = 10^{18}$ м$^{-3}$, а при $T = 650$ К получаем $n_{\text{ш}} = 10^{25}$ м$^{-3}$.

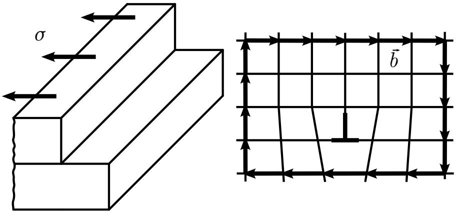


Рис. 1.10. Обход линии дислокации по контору Бюргерса

Чтобы достичь более высокой $n_{\text{ш}}$, производят закалку кристалла, чем фиксируют установившуюся при высокой T большую концентрацию вакансий. Кроме рассмотренного точечного дефекта, связанного с «испарением» атома, возможен *переход атома в междуузлие*. В этом случае образуется вакансия и дислоцированный атом. Такой парный дефект называется *дефектом по Френкелю* (рис. 1.9, *а*). Если $n_{\text{ф}}$ — число атомов, ушедших из узлов решетки, а N'_a — количество мест для междуузельной локализации их, то аналогично предыдущему,

$$n_{\text{ф}} = \sqrt{N_a\, N'_a}\, e^{\left(-\frac{\varepsilon_{\text{ф}}}{k\,T}\right)},$$

где $\varepsilon_{\text{ф}}$ — энергия образования дефекта по Френкелю.

Точечные дефекты мигрируют в объеме кристалла. Вакансия и межузельный атом, взаимодействуя, могут аннигилировать. Образование рядом с имеющейся второй вакансии (дивакансии) связано с меньшей, чем при образовании двух изолированных вакансий затратой энергии. Поэтому точечные дефекты могут образовывать скопления — *комплексы дефектов* [1].

Линейные дефекты. К линейным дефектам относятся *дислокации*. Различают краевые (или линейные) и винтовые (или спиральные) дислокации. Дислокации возникают в процессе роста кристаллов и при сдвиговых напряжениях. Линия, отделяющая деформированную область кристалла от недеформированной или искаженный ряд атомов от неискаженного, называется *линией* или *осью дислокации*. В зоне дислокации имеется избыточная энергия. Краевая дислокация обозначается символом $\top$ или $\perp$, где вертикальная черта указывает вдвигаемую плоскость, а горизонтальная — показывает плоскость сдвига. Величина и направление сдвига в решетке определяются *вектором Бюргерса* ($\vec{B}$).

Обходя линию дислокации по контуру Бюргерса, можно определить величину $\vec{B}$, который перпендикулярен линии дислокации (рис. 1.10).

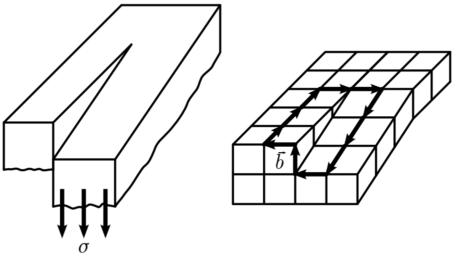


Рис. 1.11. Обход по контуру Бюргерса вокруг оси винтовой дислокации

Обход по контуру Бюргерса вокруг оси винтовой дислокации также дает величину вектора $\vec{B}$, который направлен параллельно оси дислокации (рис. 1.11).

Вокруг линии дислокации можно выделить область кристалла, находящуюся в упруго деформированном состоянии — *ядро дислокации*, плотность энергии которой определяется $\gamma = \frac{1}{2} G \varepsilon^2$, где G — модуль сдвига, ε — деформация. Поскольку $\varepsilon \sim B$, энергия дислокации $E_д$ пропорциональна B^2, и приближенно можно считать $E_д = G B^2 l_д$, где $l_д$ — *длина дислокации*.

Дислокации могут взаимодействовать между собой, что сопровождается *тепловым эффектом дислокационной реакции*. Если $B^2 > \left(B_1^2 + B_2^2\right)$, где $\vec{B}_1$ и $\vec{B}_2$ — векторы Бюргерса образовавшихся дислокаций, то происходит самопроизвольное расщепление дислокаций. Расщепление индифферентно, если $B^2 = B_1^2 + B_2^2$, и невозможно при $B^2 < (B_1^2 + B_2^2)$.

Величина $E_д$ в среднем составляет $E_д \approx 10^{-9}$ Дж/м. Поскольку $E_д \sim l_д$, то дислокации проявляют тенденцию к самопроизвольному сокращению, что понижает их энергию. Плотность дислокаций в отожженных кристаллах находится в пределах 10^6–10^{13} м$^{-2}$, а в нарушенных — 10^{13}–10^{18} м$^{-2}$.

Дислокации при воздействии небольших внешних напряжений могут размножаться ($\vec{B} \to \vec{B}_1 + \vec{B}_2$) и повышать свою концентрацию в кристалле. Отсюда становится понятным, что к механической обработке кристаллов во избежание увеличения концентрации дислокаций следует относится с большой осторожностью. При взаимодействии с V дислокации могут переползать перпендикулярно к плоскости скольжения. При аннигиляции двух дислокаций противоположного знака $\top$ и $\perp$ возможно образование V. Наличие дислокации экспериментально выявляется несколькими

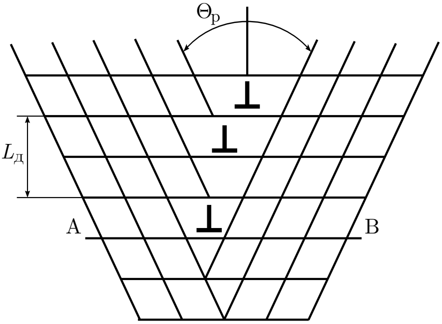


Рис. 1.12. Блоки

методами. В зоне выхода дислокации на поверхность образца скорость химического травления вещества значительно больше, чем в остальной части кристалла (механохимический эффект). В результате образуются ямки травления, которые наблюдаются с помощью оптического микроскопа [1].

Поверхностные дефекты. К *поверхностным дефектам* относят дефекты, образующие мозаичную структуру поверхности: блоки, двойники, дефекты упаковки.

Блоки представляют собой участки с упорядоченным расположением атомов, граничащие с другими участками, отличающимися также упорядоченным расположением атомов, но несколько другой ориентации упорядочения (рис. 1.12). Угол разориентации блоков ($\Theta_р$) находится в пределах от нескольких секунд,

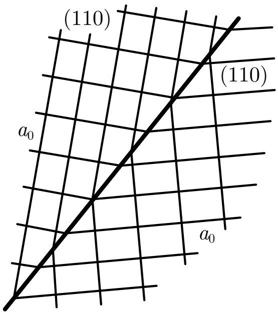


Рис. 1.13. Двойники

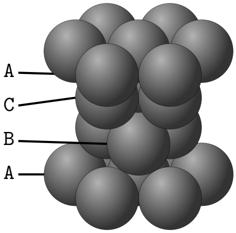


Рис. 1.14. Дефекты упаковки

до нескольких минут. В очень дефектных кристаллах угол $\Theta_\text{р}$ достигает $\sim 20^\circ$. Размеры таких блоков колеблются от 10^{-8} до 10^{-3}. Блоки разделены границей, образованной группой дислокаций, — краевых и винтовых. При малых разориентациях блоков величина $\Theta_\text{р} = \frac{B}{L_\text{д}}$, где $L_\text{д}$ — расстояние между дислокациями. Блочная структура увеличивает энергию кристалла, а межблочные границы являются зонами интенсивного рассеяния носителей заряда и закрепления доменных стенок.

Экспериментальные наблюдения блоков осуществляются методами рентгеновской топографии.

Двойники в кристаллах возникают в процессе роста кристалла, а также в результате механических воздействий. Структура двойника может рассматриваться как зеркальное отражение в двойниковой плоскости некоторой части кристалла (рис. 1.13). При этом двойниковой плоскостью является кристаллографическая плоскость, а положение примыкающих к плоскости атомов согласовано с остальной частью кристаллической решетки. Двойники различаются только ориентацией кристаллической решетки, а границы между ними мало изменяют энергию кристалла.

Дефекты упаковки представляют собой нарушения в расположении периодически чередующихся слоев в сложных структурах кристаллов. Например, в плотноупакованной гранецентрированной кубической решетке на некоторый слой A накладываются последовательно слои B и C, образующие плотноупакованную структуру (рис. 1.14). Таким образом, в сечении этой слоистой структуры последовательность атомных слоев имеет вид ABCABCABC... Дефект упаковки состоит в нарушении этой последовательности, причем здесь возможны два типа нарушений — дефект вычитания и дефект внедрения.

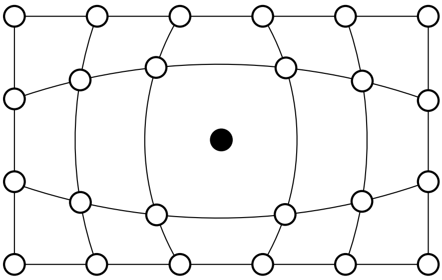
Дефект типа вычитания отражает удаление какого-либо слоя из последовательности; например, в ABCBCABC отсутствует слой A.

Дефект типа внедрения отражает внедрение какого-либо дополнительного слоя; например, в последовательности ABCABCBABCABC внедрен слой B.

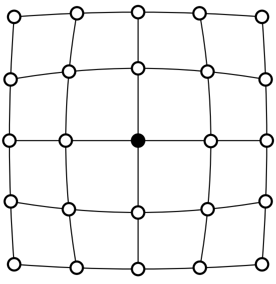
Дефект упаковки типа вычитания является «двойным» дефектом упаковки, поскольку он эквивалентен двум дефектам типа внедрения (единичным дефектам), т. е. отсутствие слоя A эквивалентно внедрению слоев C и B. Поэтому энергия дефекта типа вычитания несколько больше энергии типа внедрения [1].

Объемные дефекты. К *объемным дефектам* монокристаллов относят ансамбли вакансий, образующих микропоры и микротрещины. Если концентрация вакансий оказывается избыточной по сравнению с равновесной, то обнаруживается направленное их перемещение к пустотам, что существенно понижает энергию. Аналогичное перемещение вакансий наблюдается в области межзеренных границ с образованием микропор, закрепленных на границах. К объемным дефектам следует отнести *поверхности реальных кристаллов*. Расстояние между поверхностями и соседними слоями атомов несколько больше, чем между внутрилежащими слоями, поскольку атомы на поверхности не полностью окружены соседями. Поверхность кристаллов не является атомарно гладкой, а содержит ступеньки [1].

Химические дефекты. Современные способы очистки веществ позволяют значительно уменьшить концентрацию примесей, однако полная очистка вещества от наличия примеси не до-



а



б

Рис. 1.15. Типы химических дефектов:
а — примесный атом внедрения, *б* — примесный атом замещения

стигнута. Атомы примеси взаимодействуют с атомами основного вещества, могут находиться в нем в виде *включений* или образовывать *твердый раствор*. Включения обнаруживаются как самостоятельная фаза. При образовании твердого раствора атомы примеси могут размещаться в междуузлиях кристаллической решетки (твердый раствор внедрения, рис. 1.15, *а*) или в узлах кристаллической решетки (твердый раствор замещения, рис. 1.15, *б*). Для образования твердого раствора замещения необходимо, чтобы радиусы атомов примеси и кристалла имели близкую величину, а заряды их были одинаковыми. Если же заряды окажутся неодинаковыми, то для сохранения электронейтральности протекают дальнейшие изменения. В ряде случаев наблюдаются нарушения стехиометрического соответствия анионов и катионов. Включения примеси и твердые растворы примеси вызывают искажения кристаллической решетки.

Кристаллические твердые тела могут быть представлены также в виде *поликристаллов*, состоящих из произвольно ориентированных *монокристаллических* мелких зерен, разделенных межзеренной границей. Размер зерен, форма и число их граней разнообразны. Форма зерен должна обеспечивать заполнение всего объема поликристалла. В поликристаллах межзеренные границы чаще проходят по стыкам граней трех зерен, что соответствует равновесию сил поверхностного натяжения межзеренных границ на ребрах и вершинах зерен. Поэтому форма зерен близка к форме кубооктаэдра. Межзеренные границы чрезвычайно дефектны: они являются стоками вакансий, примесей и пор и отличаются весьма разупорядоченной структурой. На границах зерен возможно образование микротрещин из-за взаимодействия дислокаций с границами [1].

1.4 Аморфные твердые тела

Существуют твердые тела, молекулы которых расположены хаотически, однако в их взаимном положении сохраняется ближний порядок. Такие тела называются *аморфными*. Состоят они из некристаллических агрегатов, включающих тысячи молекул, и сохраняют упругость формы. Аморфное тело рассматривают как переохлажденную жидкость с большим коэффициентом вязкости, что практически исключает взаимный обмен местами сосед-

них молекул. Поскольку внутренняя энергия аморфных тел всегда больше внутренней энергии кристаллических тел, аморфное состояние является метастабильным, и аморфные тела проявляют тенденцию к кристаллизации.

Характерными признаками аморфных тел являются отсутствие точки плавления и изотропность физических свойств.

К органическим аморфным твердым телам относятся полимеры, которые образуются из молекул низкомолекулярного вещества — мономера. В результате реакции полимеризации радикалов (R) создается сложная пространственная хаотическая структура *макромолекулы* $[-\mathrm{R}-]_n$. Молекулы полимеров имеют большую длину и переплетаются между собой. Первичная структура аморфного тела образуется приблизительно параллельным расположением пучка макромолекул, называемым *пачкой*, или в результате сворачивания большого числа макромолекул в *глобулы*. Физико-химические свойства полимеров зависят от стереохимического состояния цепей и взаимного расположения макромолекул. Полимеры могут изменять структуру вследствие образования боковых ответвлений и более коротких молекул (деструкция). Аморфные полимеры в зависимости от температуры могут находиться в трех состояниях:

- стеклообразном;
- высокоэластичном;
- пластического течения.

В *стеклообразном состоянии* молекулы связаны между собой очень прочно и поэтому тела при механических воздействиях испытывают незначительную деформацию. В *высокоэластичном состоянии* даже при небольших нагрузках полимер испытывает значительную обратимую деформацию. Это объясняется тем, что макромолекулы находятся в изогнутом состоянии и под воздействием внешних усилий могут изменять свою форму без поступательного относительного перемещения. Если при нагревании полимера его молекулы приобретают способность относительного перемещения, то полимер переходит в состояние *пластического течения*, для которого характерны необратимые деформации. Переходы полимера из одного состояния в другое наблюдаются не при строго определенной температуре, а в некотором узком температурном интервале. Такие полимеры относятся к *термопластичным* аморфным твердым телам. Существует другая груп-

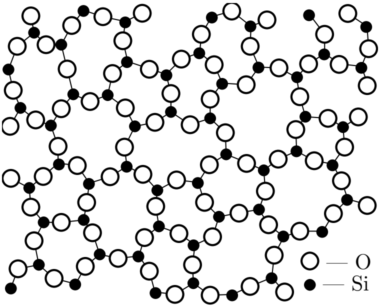
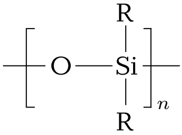


Рис. 1.16. Кремнийкислородный тетраэдр

па полимеров — *термореактивные*, которые при нагревании сначала плавятся, затем прекращают плавится, и при дальнейшем повышении температуры наблюдается их деструкция.

Если радикалы R связаны между собой с помощью неорганических звеньев, то образуется новая группа аморфных твердых тел — *элементоорганические полимеры*, например кремнийорганические:



В качестве радикалов R могут быть группы CH_3, C_2H_5 и др. Такие вещества отличаются химической стойкостью, негорючестью, высокой эластичностью, электрической прочностью, гидрофобностью. Для полимерных покрытий характерным является наличие *внутренних напряжений* (σ_i), на возникновение которых оказывают влияние условия отверждения. Так, в эпоксидных смолах отвержденных при комнатной температуре, σ_i близки к нулю. Отверждение эпоксидных смол при высоких температурах приводит к возникновению $\sigma_i \approx 200$ кг/см^2. К *неорганическим* аморфным телам относятся стеклообразующие окислы SiO_2, B_2O_3, P_2O_5.

Для объяснения природы стекловидного состояния таких веществ высказано много гипотез, однако до настоящего времени не существует единой теории строения. Наиболее привлекательной оказалось *гипотеза трехмерной апериодической сетки*. Согласно

этой гипотезе строение аморфного кварцевого стекла описывается структурным элементом — *кремнийкислородным тетраэдром*, который показан на рис. 1.16. Более сложные стекла описываются *кислородным полиэдром*, в центре которого находится характеризующий элемент.

К аморфным твердым телам относятся также *халькогенидные стекла*, т. е. соединения с серой, селеном и теллуром (аналогами кислорода). Из табл. А.4 видно, что аморфные твердые тела образуются путем соединения элементов групп I–IV–V (органические полимеры), II–III–IV–V–VI (кислородные стекла), III–IV–V–VI (халькогенидные стекла).

При определенных условиях или с течением времени возможно *расстекловывание* или *девитрификация* стеклообразующих веществ. Суть явления состоит в выделении кристаллической фазы в общей аморфной среде. Поскольку аморфная среда имеет значительно больший коэффициент теплового расширения, чем кристаллическая фаза, то возникают существенные σ_i, приводящие к разрушению образцов. В многокомпонентных аморфных телах вследствие образования микрорасслаивающихся систем обнаруживаются микронеоднородности как химического состава, так и физических свойств. Поскольку структуру аморфных тел можно рассматривать в связи со строением жидкости, с одной стороны, и кристалло-химической структурой неорганических соединений — с другой, то к дефектам структуры таких аморфных тел следует отнести микропустоты, нарушения химической и структурной однородности примесными атомами, разрывы цепей или сеток [1].

Глава 2

Проводниковые материалы

2.1 Общие сведения о проводниках

Проводниками электрического тока могут служить твердые тела, жидкости, а при соответствующих условиях и газы.

Твердыми проводниками являются металлы, металлические сплавы и некоторые модификации углерода.

К металлам относят пластичные вещества с характерным для них блеском, которые хорошо проводят электрический ток и теплоту. Среди материалов электронной техники металлы занимают одно из важнейших мест.

К жидким проводникам относятся расплавленные металлы и различные электролиты. Как правило, температура плавления металлов высока, за исключением ртути и галлия, у которых она составляет 39°С и 29,8°С соответственно. Поэтому при нормальной температуре в качестве жидкого металлического проводника может быть применена только ртуть. Другие металлы являются жидкими проводниками лишь при высоких температурах.

Механизм прохождения тока по металлам в твердом и жидком состояниях обусловлен движением свободных электронов, вследствие чего их называют проводниками с электронной электропроводностью или проводниками первого рода.

Электролитами, или проводниками второго рода, являются растворы (в основном водные) кислот, щелочей и солей, а так-

же расплавы ионных соединений. Прохождение тока через такие проводники связано с переносом вместе с электрическими зарядами частей молекул (ионов), в результате чего состав электролита постепенно изменяется, а на электродах выделяются продукты электролиза.

Все газы и пары́, в том числе и пары́ металлов, при низких напряженностях электрического поля не являются проводниками. Сильно ионизированный газ при равенстве числа электронов и положительных ионов в единице объема представляет собой особую равновесную проводящую среду — плазму.

К материалам высокой проводимости принято относить проводники с удельным электрическим сопротивлением в нормальных условиях не более 0,1 мкОм·м. Наиболее распространенными среди этих материалов являются медь и алюминий [3].

2.2 Медь

Преимущества меди, которые обеспечивают ей широкое применение в качестве проводникового материала, следующие:

- малое удельное сопротивление;
- достаточно высокая механическая прочность;
- относительно высокая коррозионная стойкость;
- хорошая обрабатываемость;
- относительная легкость пайки и сварки [3].

Свойства меди. Удельная проводимость меди весьма чувствительна к наличию примесей. Примеси оказывают сильное влияние на проводимость меди, снижая ее в зависимости от примесей:

- 5% — Zn, Cd, Ag;
- 25–40% — Ni, Sn, Al;
- 55% — Be, As, Fe, Si, P.

В то же время присадки многих металлов повышают механическую прочность и твердость меди [3].

Получение меди. Медь получают путем переработки сульфидных руд, чаще других встречающихся в природе. После ряда плавок руды и обжигов с интенсивным дутьем, медь обязательно

подвергают электролитической очистке. Можно получить различную по физическим свойствам медь:

- методом холодной протяжки получают твердую медь (ТМ), которая имеет высокий предел прочности при растяжении, твердость и упругость при изгибе; проволока из твердой меди несколько пружинит. Имеет малое относительное удлинение при изгибе;
- методом отжига получится мягкая медь (ММ), которая пластична, обладает малой твердостью и прочностью, более высокой удельной проводимостью. Также обладает весьма большим относительным удлинением при разрыве [3].

Применение меди. Медь применяют в электротехнике:

- для изготовления проводов, кабелей, шин распределительных устройств;
- обмоток трансформаторов, электрических машин, токоведущих деталей;
- анодов в гальваностегии и гальванопластике, мощных генераторных ламп (ММ);
- неизолированные провода (ТМ);
- в качестве экранов кабелей;
- в микроэлектронике в виде осажденных на подложки пленок, которые являются проводящими соединениями между функциональными элементами схемы;
- для спаев со стеклами [3].

2.3 Алюминий

Преимущества алюминия, которые обеспечивают ей широкое применение в качестве проводникового материала, следующие:

- легкий материал;
- малая плотность;
- дешевизна и доступность;
- распространен в природе (1-е место по количеству среди металлов в земной коре).

Алюминий получают электролизом глинозема Al_2O_3 в расплаве криолита Na_3AlF_6 [3].

Поверхность алюминия. Отдельно стоит поговорить о поверхности алюминия, так как он активно окисляется покрывается тонкой пленкой окиси с большим электрическим сопротивлением. Такая пленка предохраняет алюминий от коррозии, но создает большое переходное сопротивление в местах контакта алюминиевых проводов, что делает невозможным пайку алюминия обычными методами. Поэтому для пайки алюминия используют ультразвуковые паяльники или пасты-припои. Более толстый слой окисла, который создает надежную электрическую изоляцию на сравнительно высокие напряжения, получают с помощью электрохимической обработки алюминия.

Наиболее широкое применение оксидная изоляция получила в электролитических конденсаторах. Ее используют также и в некоторых типах выпрямителей и разрядников. На практике важное значение имеет вопрос защиты от гальванической коррозии в местах контакта алюминия и меди. Если область контакта подвергается воздействию влаги, то возникает местная гальваническая пара с довольно высоким значением э. д. с., причем полярность этой пары такова, что на внешние поверхности контакта ток направлен от алюминия к меди, вследствие чего алюминиевый проводник может быть сильно разрушен коррозией. Поэтому места соединения медных проводников с алюминиевыми должны быть тщательно защищены от увлажнения.

Пленки алюминия широко используют в интегральных микросхемах в качестве контактов и межсоединений. Последние обеспечивают связь между отдельными элементами схемы и внешние присоединения. Преимущества алюминия как контактного материала состоят в том, что этот материал легко напыляется, обладает хорошей адгезией к кремнию [3].

2.4 Никель

Серебристо-белый металл с плотностью, равной плотности меди, широко применяют в электровакуумной технике в качестве материала для арматуры электронных ламп, некоторых типов катодов, так никель достаточно легко получить в чистом виде и ввести в него специальные легирующие присадки кремния, марганца и др.

К положительным свойствам никеля следует отнести достаточную механическую прочность его после отжига при большом относительном удлинении ($\delta_p = 400 \div 600$ МПа, $\frac{\Delta l}{l} = 35 \div 50\%$). Он даже в холодном состоянии легко поддается всем видам механической обработки: ковке, прессовке, прокатке, штамповке и т. п. Из никеля можно изготовить различные по размерам и сложные по конфигурации изделия с жестко выдержанными допусками. Из всех примесей наиболее вредной оказывается сера, которая резко снижает механическую прочность материала.

Ценным свойством никеля является химическая устойчивость, особенно к растворам щелочей, которые не действуют на него даже в нагретом состоянии.

Помимо применения в электровакуумной технике никель используют в качестве компонента ряда магнитных и проводниковых сплавов, а также для защитных и декоративных покрытий изделий из железа. Очень близкими механическими и электрическими свойствами обладает кобальт. Его используют в качестве составной части многих магнитных и жаростойких сплавов, а также сплавов с маленькими температурными коэффициентами линейного расширения [3].

2.5 Хром

Весьма распространенный в земной коре элемент, обладающий высокой стойкостью к окислению, а потому используемый для защитных покрытий изделий, в том числе эксплуатируемых при повышенных температурах. Хромирование производят электролитически или с помощью насыщения хромом поверхностных слоев стальных изделий посредством диффузии из внешней среды.

Из тонких пленок хрома изготавливают резисторы и адгезионные подслои для контактных площадок и токопроводящих соединений в интегральных микросхемах, а также светонепроницаемые слои фотошаблонов. Электрические свойства хромовых пленок очень чувствительны к условиям нанесения из-за поглощения остаточных газов в процессе охлаждения. Однако хром обладает хорошей адгезией к стеклянным, ситалловым и керамическим подложкам. Кроме того, хром хорошо совместим с любым проводящим материалом. Дополнительным преимуществом хро-

ма является легкость сублимации при получении пленок. Обычно для этих целей используют вольфрамовый или молибденовый испаритель. Термообработка пленок хрома в вакууме вызывает понижение сопротивления вследствие эффектов отжига, отсутствующих у более тугоплавких пленок, таких, например, как тантал.

Хром входит в состав большого количества сплавов для нагревательных приборов, термопар, конструкционных нержавеющих, жаропрочных сталей и магнитных материалов [3].

2.6 Золото

Золото — блестящий металл желтого цвета, обладающий высокой пластичностью. Предел прочности при растяжении золотой проволоки составляет 150 МПа, относительное удлинение при разрыве порядка 40%.

В электронной технике золото используют как контактный материал, материал для коррозионно-устойчивых покрытий резонаторов СВЧ, внутренних поверхностей волноводов. Существенным преимуществом золота как контактного материала является его стойкость против образования сернистых и окисных пленок в атмосферных условиях как при комнатной температуре, так и при нагревании. Тонкие пленки золота применяются в качестве полупрозрачных электродов в фоторезисторах и полупроводниковых фотоэлементах, а также в качестве межсоединений и контактных площадок в пленочных микросхемах. В последнем случае из-за плохой адгезии к диэлектрическим подложкам пленки золота наносят обычно а с адгезионным подслоем (чаще всего хрома). В контактах золота с алюминием происходит постепенное образование ряда интерметаллических соединений, обладающих повышенным удельным сопротивлением и хрупкостью. Поэтому контакты тонких пленок золота и алюминия надежны [3].

2.7 Серебро

Серебро — белый, блестящий металл, стойкий к окислению при номарльной температуре; от других металлов отличается наименьшим удельным сопротивлением (0,0150 мкОм·м).

Предел прочности при растяжении для серебряной проволоки составляет около 200 МПа, отнсоительное удлинение при разрыве — порядка 50%.

Серебро применяется в широкой номенклатуре контактов в аппаратуре разных мощностей. Высокие значения удельных теплоемкости, теплопроводности и электрической проводимости серебра обеспечивают по сравнению с другими металлами наименьший нагрев контактов и быстрый отвод теплоты от контактных точек. Серебро применяют также для непосредственного нанесения на диэлектрики, в качестве электродов, в производстве керамических и слюдяных конденсаторов. Для этого применяют метод вжигания или испарения в вакууме. Серебром покрывают внутренние поверхности волноводов для получения слоя высокой проводимости. С этой же целью серебрению подвергают проводники высокочастотных катушек.

Недостатком серебра является склонность к миграции внутрь диэлектрика, на который оно нанесено, в условиях высокой влажности, а также при высоких температурах окружающей среды. Про сравнению с другими благородными металлами серебро обладает пониженной химической стойкостью. В частности, серебро обладает склонностью к образованию непроводящих темных пленок сульфида Ag_2S в результате взаимодействия с сероводородом, следы которого всегда присутствуют в атмосфере. Наличие влаги ускоряет протекание реакции. Поэтому серебряные контакты не рекомендуется применять по соседству с резиной, эбонитом и другими материалами, содержащими серу. Серебро хорошо паяется обычными припоями. Широкое применение серебра сдерживается его большим природным дефицитом [3].

2.8 Платина

Платина — белый металл, практически не соединяющийся с кислородом и весьма стойкий к химическим реагентам. Платина прекрасно поддается механической обработке, вытягивается в очень тонкие нити и ленты. В отличие от серебра, платина не образует сернистых плеток при взаимодействии с атмосферой, что обеспечивает платиновым контактам стабильное сопротивление, что очень важно. Она практически не растворяет кислород, пропуская его через себя в нагретом состоянии.

Платину применяют для изготовления термопар, рассчитанных на рабочие температуры до 1600°C. Особо тонкие нити из платины диаметром около 0,001 мм для подвесок подвижных си-

стем в электрометрах и других чувствительных приборах получают многократным волочением (способ обработки металлов давлением) биметаллической проволоки платина-серебро с последующим растворением наружного слоя серебра в азотной кислоте (на платину азотная кислота не действует).

Вследствие малой твердости платина редко используется для контактов в чистом виде, но служит основой для некоторых контактных сплавов. Наиболее распространенными являются сплавы платины с иридием; они не окисляются, имеют высокую твердость, малый механический износ, допускают большую частоту включений, однако дороги и применяются в тех случаях, когда необходимо обеспечить высокую надежность контактов [3].

2.9 Палладий

Палладий — серебристо-серый металл, по внешнему виду напоминающий платину, с наименьшим удельным весом и температурой плавления из всех платиновых металлов; в чистом виде мягок, пластичен, легко поддается обработке. Палладий по ряду свойств близок к платине и часто служит ее заменителем, так как дешевле в 4–5 раз. Использование палладия в электровакуумной технике обусловлено его способностью интенсивно поглощать водород. Последний, в отличие от других газов, диффундирует в палладий при сравнительно низких температурах (150–300°C) и избыточном давлении 0,015–0,1 МПа, а затем вновь выделяется в чистом виде при нагревании палладия в вакууме до температур 350–500°C. Твердый палладий поглощает более чем 850-кратный объем водорода по отношению к собственному объему. Выделенным из палладия чистым водородом наполняют некоторые типы газоразрядных приборов. Палладий и его сплавы с серебром и медью применяют в качестве контактных материалов. В отожженном состоянии палладий обладает хорошими механическими свойствами: предел прочности при растяжении — порядка 200 МПа, относительное удлинение при разрыве — 40% [3].

2.10 Сравнение проводников

Удельное сопротивления алюминия в 1,6 раза больше удельного сопротивления меди, но алюминий в 3,5 раза легче меди. Бла-

годаря малой плотности обеспечивается бóльшая проводимость на единицу массы, т. е. при одинаковом сопротивлении и одинаковой длине алюминиевые провода в два раза легче медных, несмотря на большее поперечное сечение. К тому же по сравнению с медью алюминий намного больше распространен в природе и характеризуется меньшей стоимостью. Недостатком меди является ее подверженность атмосферной коррозии с образованием окисных и сульфидных пленок. Скорость окисления быстро возрастает при нагревании, однако прочность сцепления окисной пленки с металлом невелика. Вследствие окисления медь не пригодна для слаботочных контактов. При высокой температуре в электрической дуге окись меди диссоциирует, обнажая металлическую поверхность. Металлическое отслаивание и термическое разложение вызывает повышенный износ медных контактов при сильных токах. Недостатками алюминия являются его низкая механическая прочность и значительная подверженность электромиграции, что приводит к увеличению сопротивления или даже к разрыву межсоединений [3].

Глава 3

Полупроводниковые материалы

3.1 Основные понятия

К полупроводникам относят вещества, занимающие промежуточное положение по своей удельной электропроводности между проводниками и диэлектриками.

Характерной особенностью полупроводников является зависимость их удельной проводимости от различных внешних параметров (температуры, освещения, электрического и магнитного полей и т. д.), а также от содержания примесей.

В зависимости от чистоты полупроводники подразделяют на собственные и примесные [3].

Собственные полупроводники. *Собственным полупроводником* называется полупроводник, в котором можно пренебречь влиянием примесей при данной температуре. Ширина запрещенной зоны не очень высока. Каждый переход электрона из валентной зоны в зону проводимости сопровождается образованием дырки в валентной зоне. Концентрация подвижных носителей заряда в таком полупроводнике увеличивается при увеличении температуры и уменьшении ширины запрещенной зоны. В состоянии термодинамического равновесия, концентрация электронов n_i равна концентрации дырок p_i, что является характерной особенностью собственных полупроводников.

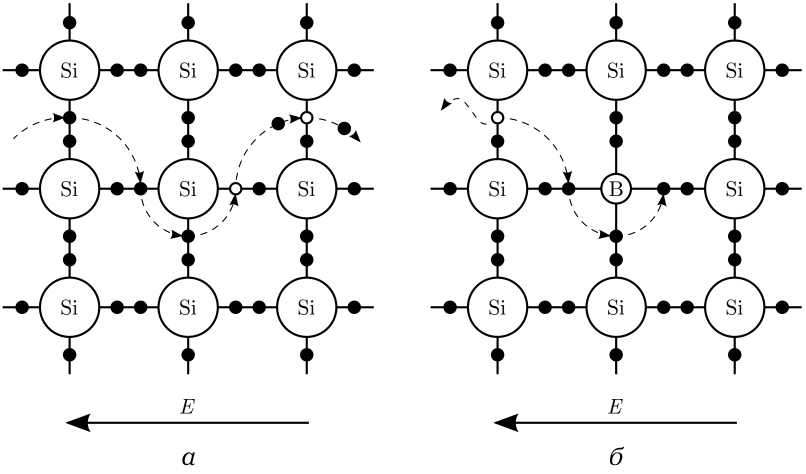


Рис. 3.1. Собственный (*а*) и примесный (*б*) полупроводники

Ширина запрещенной зоны характеризует энергетические затраты, связанные с отрывом электронов от атома. При отрыве электрона образуется дырка. Атомы, потерявшие электроны, превращаются в положительно заряженный ион, который может заимствовать электрон соседнего атома, который превращается в ион (рис. 3.1, *а*). В этом состоит механизм перемещения дырок по кристаллу.

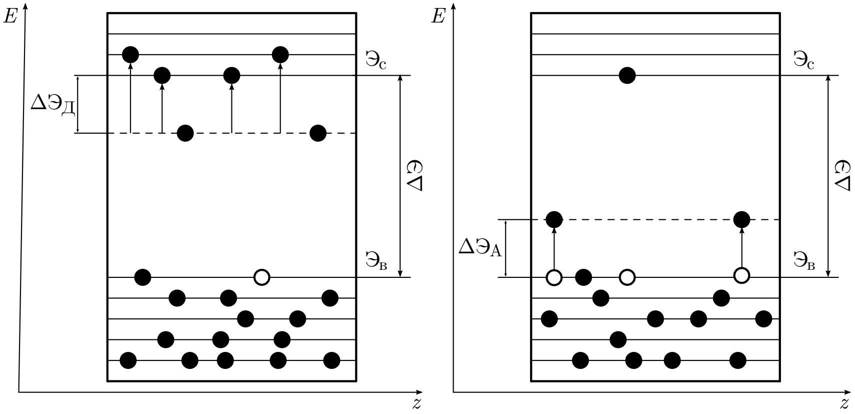
Под действием внешнего электрического поля движение становится направленным. При этом дырки движутся к отрицательному полюсу источника, электроны к положительному.

Рассмотренный случай собственной электропроводности позволяет оценить потенциальные возможности материала. Работа большинства полупроводниковых приборов нарушается при появлении собственной электропроводности [3].

Примесные полупроводники. *Примесный полупроводник* — полупроводник, электрофизические свойства которого в основном определяются примесями (рис. 3.1, *б*). Дефекты структуры, в первую очередь вакансии и междуузельные атомы, могут также играть роль примесей.

При малой концентрации примеси в запрещенной зоне появляются дополнительные дискретные *энергетические уровни*.

В зависимости от валентности, примеси могут отдавать электроны в зону проводимости или принимать их с уровней валентной зоны (рис. 3.2). Если валентность примеси превышает валент-



а *б*

Рис. 3.2. Энергетические диаграммы полупроводников n-типа (*а*) и p-типа (*б*):
ΔЭ — ширина запрещенной зоны, ΔЭ$_Д$ — энергия активации доноров, ΔЭ$_А$ — энергия активации акцепторов

ность основных атомов, то примесь является *донорной*. Если валентность примеси меньше валентности основных атомов, то примесь является *акцепторной* [3].

Донорные примеси. Если примеси поставляют электроны в зону проводимости, то они называются *донорными*. Электроны таких примесей находятся на энергетических уровнях, расположенных вблизи нижнего края зоны проводимости (рис. 3.2, *а*). Для перехода таких электронов в зону проводимости достаточно энергии значительно меньшей энергии ионизации собственных атомов полупроводника.

Концентрация электронов в таких материалах выше концентрации дырок, поэтому они называются полупроводниками n-типа [3].

Акцепторные примеси. Если примеси захватывают электроны валентной зоны, они называются *акцепторными*. Электроны таких примесей находятся на энергетических уровнях, расположенных вблизи верхнего края валентной зоны (рис. 3.2, *б*), и не участвуют в электрическом токе.

Концентрация дырок в таких материалах больше концентрации электронов, поэтому они получили название полупроводников p-типа [3].

Концентрация носителей заряда. Носители заряда, концентрация которых больше, называют *основными*, носители заряда с меньшей концентрацией — *неосновными*.

Если в полупроводнике n-типа увеличивать число доноров, то возрастет скорость генерации основных носителей заряда. Однако это приведет к росту скорости обратного процесса — рекомбинации носителей заряда. Связь связь между равновесными концентрациями электронов n_0 и дырок p_0, также называемая *соотношением «действующих масс»* выражается уравнением:

$$n_0\, p_0 = n_i^2, \tag{3.1}$$

где n_i — равновесная концентрация электронов в собственном полупроводнике. Из (3.1) видно, что в условиях термодинамического равновесия при заданной температуре произведение концентраций электронов и дырок есть величина постоянная, не зависящая от содержания примесей [4].

3.2 Простые полупроводники

3.2.1 Кремний

Получение. Получение кремния полупроводниковой чистоты состоит из следующих этапов:

1. превращение кремния в легколетучее соединение, которое после очистки может быть легко восстановлено;
2. очистка соединения физическими и химическими методами;
3. восстановление соединения с выделением чистого кремния;
4. окончательная кристаллизационная очистка и выращивание монокристаллов.

Свойства. При нормальных условиях кремний весьма инертен, нерастворим в воде, не вступает в реакцию со многими кислотами.

При нагревании легко взаимодействует с галогенами, на воздухе при температуре свыше 900° C начинает интенсивно окисляться с образованием двуокиси SiO_2, а при температуре 1100–1300° C соединяется с азотом, образуя нитрид Si_3N_4. Растворим во многих расплавленных металлах (Al, Ga, Sn, Au, Ag), с рядом

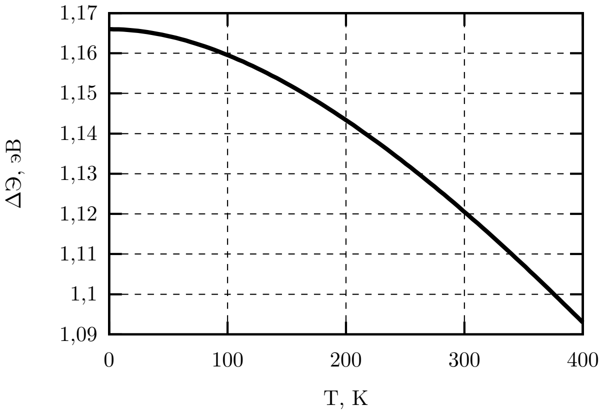


Рис. 3.3. Зависимость ширины запрещенной зоны кремния от температуры

металлов (Cr, Mo, Fe, Cu, Mg) образует устойчивые соединения — силициды.

Основные физические свойства сведены в табл. А.2. Зависимость ширины запрещенной зоны от температуры показана на рис. 3.3. При температуре свыше 250 К можно приближенно считать, что зависимость имеет линейных характер [3].

Поверхность кремния. Поверхность кремния после любой очистки при контакте с воздухом покрывается пленкой диоксида (1 . . . 5 нм). Это оказывает существенное влияние на электрофизические свойства материала, поэтому применяются пассивирующие покрытия, защищающие поверхность и сформированные p–n-переходы.

Наиболее широко применяются пленки SiO_2, маскирующие свойства которых используются при проведении процессов фотолитографии и избирательной диффузии. На практике применяются слои толщиной 0,2 . . . 1,2 мкм.

Лучшими защитными и диэлектрическими свойствами обладает нитрид кремния Si_3N_4. Слои толщиной порядка 0,1 мкм при температурах 1100 . . . 1200°C непроницаемы для большинства донорных и акцепторных примесей, используемых при диффузионном легировании кремния.

Аморфные покрытия способствуют уменьшению напряжений на границе раздела с подложкой. Слои Si_3N_4 всегда аморфны,

если температура кремниевой подложки ниже 900°C. Электрическая прочность слоев нитрида кремния достигает 10^9 В/м, а диэлектрическая проницаемость, как у типичного ионного диэлектрика, от 7 до 10 [3].

Легирование. Элементы V и III групп являются соответственно донорами и акцепторами. Энергия ионизации таких примесей составляет порядка 0,05 эВ [3].

Эпитаксия. В промышленности широко распространен способ получения кремниевых эпитаксиальных слоев, основанный на процессе водородного восстановления тетрахлорида кремния (см. раздел 3.6):

$$SiCl_4\ _{(газ)} + 2H_2\ _{(газ)} \leftrightarrow Si_{(тв)} + 4\,HCl_{(газ)}.$$

Реакция протекает при температуре 1200°C. Осаждение производится на монокристаллические кремниевые подложки или, в ряде случаев при изготовлении интегральных схем, на монокристаллические диэлектрические подложки. Перед осаждением подложки подвергаются травлению, для чего в поток газа-носителя добавляют пары́ HCl. Это позволяет удалить окисел с поверхности полупроводника. Скорость роста регулируется соотношением газовых потоков реагентов и температурой. Оптимальной является скорость порядка 15…20 нм/с. Толщина используемых слоев составляет от 2 до 20 мкм.

В процессе эпитаксии возможно легирование слоев путем добавления в газ паров соединений, содержащих примесные элементы (PCl_3, AsH_3, и т. п.).

Относительно невысокие температуры и низкие скорости кристаллизации позволяют получать эпитаксиальные слои с высокой чистотой и совершенной структурой [4].

Очистка и выращивание монокристаллов. Для очистки кремния применяются химические методы. Кристаллизационные методы используются для превращения поликристаллического кремния в монокристаллы, выращиваемые методом Чохральского и методом бестигельной зонной плавки [4].

Применение. Кремний является основным материалом при изготовлении транзисторов, аналоговых и цифровых интегральных микросхем. В качестве активных элементов цифровых ИМС преимущественно используются полевые МДП-транзисторы или биполярные транзисторы.

Значительную долю полупроводниковых приборов составляют кремниевые дискретные приборы. Это выпрямительные, им-

пульсные и СВЧ-диоды, биполярные транзисторы, полевые транзисторы, приборы с зарядовой связью. Кремниевые транзисторы могут работать на частотах порядка 10 ГГц. На основе кремния создают лучшие стабилитроны (имеют напряжение стабилизации от 3 до 400 В) и тиристоры.

Наиболее масштабной областью применения кремниевых дискретных приборов является силовая электроника и силовая преобразовательная техника (вентили, тиристоры, мощные транзисторы). Мощные кремниевые приборы могут работать при напряжении до 10 кВ и пропускать ток в прямом направлении до 7000 А. Такие приборы используются в системах и устройствах преобразования электрической энергии, в автомобилях, в источниках вторичного питания с бестрансформаторным входом, в роботах, сварочных аппаратах, электротранспорте, устройствах бытовой электроники и др.

Также применяются кремниевые фоточувствительные приборы, особенно фотодиоды. Спектр чувствительности фотодетекторов (0,3 . . . 1,1 мкм) хорошо согласуется со спектром излучения многих полупроводниковых источников света. Солнечные батареи изготавливаются на основе кремниевых фотоэлементов. Принцип их действия основан на генерации неравновесных носителей заряда при поглощении фотонов и последующем их разделении внутренним полем p–n-перехода. КПД кремниевых фотоэлементов составляет 10 . . . 12%.

Детекторы ядерных излучений, датчики Холла и, благодаря сильной зависимости удельного сопротивления от механических деформаций, тензодатчики производятся на основе кремния.

Кремниевые приборы могут работать при температурах до 180–200°C [4].

3.2.2 Германий

Получение. Основными источниками промышленного получения германия являются побочные продукты цинкового производства, коксования углей, германиевые концентраты, получаемые из медносвинцовоцинковых руд.

Получение германия:

1. получение тетрахлорида германия $GeCl_4$, представляющего собой жидкость с температурой кипения 83° C;

2. очистка методами экстракции и ректификации;
3. гидролиз:
$$GeCl_4 + 2\,H_2O \to GeO_2 + 4\,HCl;$$
4. восстановление двуокиси германия водородом:
$$GeO_2 + 2\,H_2 \xrightarrow{650\text{–}700^\circ\,C} Ge + 2\,H_2O.$$

   Данная стадия совмещается с плавлением образующегося порошка германия и направленной кристаллизацией расплава. В дальнейшем полученные слитки:

   - подвергают зонной плавке для получения особо чистого германия;
   - или используют при выращивании легированных монокристаллов.

Свойства. Чистый германий обладает металлическим блеском, высокой твердостью и хрупкостью. Кристалл германия обладает структурой алмаза.

Кристаллический германий химически устойчив на воздухе при комнатной температуре. При нагревании свыше 650° C окисляется, образуя двуокись GeO_2.

При комнатной температуре германий нерастворим в воде, соляной и разбавленной серной кислотах. Растворим в смеси азотной и плавиковой кислот, растворе перекиси водорода.

При нагревании интенсивно взаимодействует с галогенами, серой и сернистыми соединениями. Германий практически не взаимодействует с графитом и кварцевым стеклом, что позволяет использовать их при проведении металлургических процессов. Жидкий германий интенсивно поглощает водород, причем водород является электрически нейтральной примесью.

Основные физические свойства приведены в табл. А.2. Германий обладает относительно невысокой температурой плавления, малым давлением насыщенного пара при этой температуре, что существенно упрощает технику очистки и выращивания монокристаллов. Зависимость запрещенной зоны от температуры представлена на рис. 3.4 [3].

Легирование. Как правило, в качестве доноров и акцепторов используют соответственно элементы V и III групп. Энергия ионизации доноров численно близка к энергии ионизации акцепторов

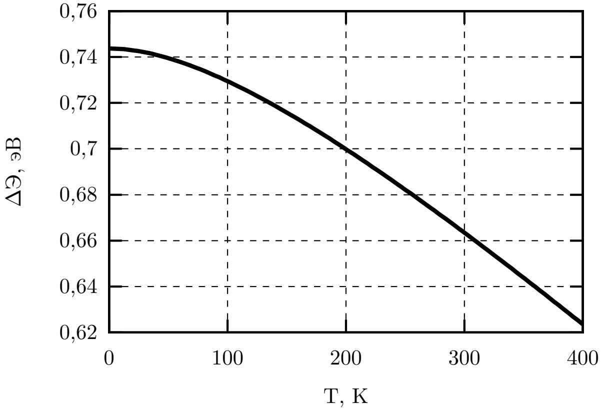


Рис. 3.4. Зависимость ширины запрещенной зоны германия от температуры

и составляет порядка 0,01 эВ. В нормальных условиях атомы этих элементов полностью ионизированы, поэтому концентрация носителей заряда определяется концентрацией примеси. Элементы других групп относительно слабо влияют на электропроводность германия [3].

Очистка и выращивание монокристаллов. Наиболее эффективным способом получения монокристаллов с минимальным количеством примесей является метод *зонной плавки* [3].

Применение. Германий используется, в первую очередь, в диодах и транзисторах. Широко распространены выпрямительные плоскостные диоды и сплавные биполярные транзисторы.

Выпрямительные плоскостные диоды рассчитаны на прямые токи от 0,3 до 1000 А при падении напряжения не более 0,5 В. Недостатком германиевых диодов являются невысокие обратные напряжения.

Германиевые транзисторы могут быть низко- и высокочастотными, мощными и маломощными. Нанесение пленочной изоляции на SiO_2 позволяет изготавливать германиевые транзисторы по планарной технологии.

Германий, легированный золотом используется в импульсных диодах.

Благодаря высокой подвижности зарядов германий применяют при изготовлении датчиков Холла.

Оптические свойства германия позволяют использовать его для изготовления фототранзисторов и фотодиодов, оптических линз (для инфракрасных лучей), оптических фильтров, а также счетчиков ядерных частиц.

Рабочие температуры германиевых приборов находятся в диапазоне от -60° до $+70^\circ$ C. Невысокий верхний предел является существенным недостатком германия [4].

3.3 Двойные полупроводниковые фазы

К двойным полупроводниковым фазам относят двойные полупроводниковые соединения и их твердые растворы. Свойства соединений закономерно меняются в зависимости от *среднего атомного номера* (см. табл. А.2):

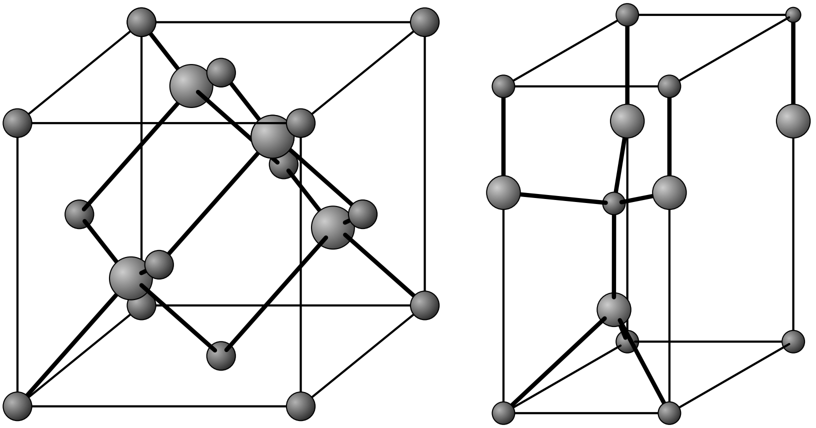
$$Z_{\text{ср}} = \frac{\sum\limits_i C_i\, z_i}{\sum\limits_i C_i},$$

где C_i — число атомов i-го компонента в формульной единице, z_i — порядковый номер i-го компонента.

Химические связи в таких соединениях являются смешанными, с преобладанием ковалентной составляющей (чаще ковалентно-ионно-металлические, реже ковалентно-ионные). Ионная составляющая обусловлена разностью электроотрицательностей атомов, входящих в соединение. Она приводит к появлению дипольного момента, который усиливает рассеяние носителей заряда. Это ведет к снижению подвижности носителей заряда. Чем сильнее выражена ионная составляющая, тем ниже подвижность носителей заряда [5].

3.3.1 Соединения типа $A^{III}B^{V}$

Структура и химическая связь. Соединения такого типа образуются в результате взаимодействия элементов III группы периодической системы с элементами V группы (см. табл. А.5), относятся к группе алмазоподобных полупроводников. Все имеют решетку цинковой обманки — *сфалерита* (рис. 3.5, *а*), кроме нитридов индия, галлия и аллюминия — для них характерна структура *вюрцита* (рис. 3.5, *б*). В обоих случаях элемент III группы



а *б*

Рис. 3.5. Элементарные ячейки сфалерита (*а*) и вюрцита (*б*)

находится в окружении четырех элементов V группы. Обе структуры не имеют центра симметрии [5] [4].

Применение. Широкое применение соединения типа $A^{III}B^{V}$ нашли в оптоэлектронике: на их основе изготавливаются инжекционные лазеры, светодиоды, фотодиоды, фотоэлементы.

Квантовый выход растет с увеличением длины волны излучения прибора, поэтому, если нет необходимости зрительного восприятия излучения, используют источники излучения ближнего ИК-диапазона спектра[1].

Для генерации излучения видимой области ширина запрещенной зоны должна быть выше 1,7 эВ. Такой характеристикой обладают, например, GaN и GaP. Однако фосфид галлия обладает непрямой структурой зон, поэтому его легируют примесями, создающими изоэлектронные ловушки — азотом (для излучения в зеленой области), цинком и кислородом (для красной люминесценции).

Принцип действия фотодиодов и фотоэлементов основан на разделении генерируемых светом носителей заряда внутренним полем p–n-перехода. Фотодиоды работают в режиме обратного включения. Для максимальной фоточувствительности и вы-

[1]Заметим, что плотность записи информации на оптические накопители тем выше, чем короче длина излучения, поэтому в этой области интересны источники голубой области спектра.

сокого быстродействия необходимо, чтобы глубина оптического поглощения примерно соответствовала глубине залегания p–n-перехода [4].

Арсенид галлия. Среди соединений типа $A^{III}B^{V}$ наиболее широкое применение нашел арсенид галлия GaAs. Его используют при изготовлении приборов микро- и оптоэлектроники, солнечной энергетики. Арсенид галлия применяется при создании транзисторов, интегральных схем, диодов, лазеров, солнечных элементов и др. По объемам производства занимает третье место после кремния и германия. GaAs обладает более высокой чем кремний термической и радиационной стойкостью. Наиболее эффективные фотоэлектрические преобразователи солнечной энергии работают на гетероструктурах AlGaAs/GaAs [4].

Твердые растворы нитрида галлия. На основе нитрида галлия GaN и его твердых растворов могут быть созданы эффективные оптоэлектронные приборы.

Регулирование состава твердого раствора нитрида галлия позволяет получить твердые растворы с различными значениями ширины запрещенной зоны, что позволяет создавать светодиоды с широкой гаммой свечения [4].

3.3.2 Полупроводниковые сверхрешетки

Сверхрешетками называют полупроводниковые структуры, состоящие из периодической последовательности монокристаллических слоев различного химического состава. Период чередования слоев меньше длины свободного пробега электронов, но существенно больше периода кристаллической решетки. Свойства сверхрешетки зависят от состава слоев и от периода их чередования.

Сверхрешетки подразделяются на композиционные (КСР), легированные (ЛСР) и композиционно-легированные (КЛСР) сверхрешетки. Рассмотрим основные типы сверхрешеток — композиционные и легированные.

Композиционные сверхрешетки состоят из слоев полупроводниковых материалов с различной запрещенной зоной. Легированные сверхрешетки состоят из последовательности очень тонких слоев одного полупроводника с разными типами электропроводности [4].

Композиционные сверхрешетки. При формировании композиционных СР используют нелегированные или слаболегирован-

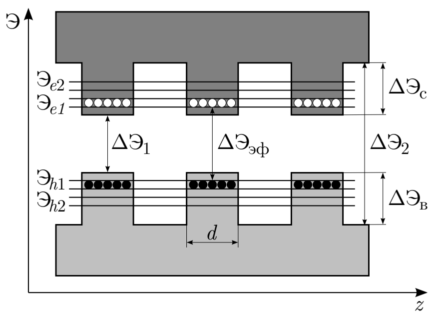


Рис. 3.6. Энергетическая диаграмма контрвариантной сверхрешетки

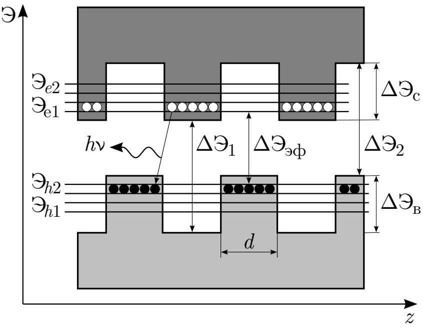


Рис. 3.7. Энергетическая диаграмма ковариантной сверхрешетки

ные полупроводниковые материалы с близкими периодами кристаллических решеток, что позволяет пренебрегать влиянием механических напряжений при искажениях структуры.

Гетеропереход композиционных сверхрешеток представляет собой контакт полупроводников с одинаковым типом электропроводности. Его особенностью является существование разрывов энергетических зон на гетерограницах. По характеру разрывов композиционные сверхрешетки делятся на контр- и ковариантные.

В *контрвариантных* сверхрешетках (сверхрешетках 1-го типа) (рис. 3.6) на гетерогранице имеет место полное взаимное перекрытие запрещенных зон сопрягаемых материалов, а сумма разрывов удовлетворяет условию:

$$\Delta Э_В + \Delta Э_С = \Delta Э_1 - \Delta Э_2.$$

Контрвариантные СР создаются на основе гетерогенных систем $GaAs/Al_xGa_{1-x}As$, $GaSb/Al_xGa_{1-x}Sb$, $InP/Ga_xIn_{1-x}P_yAs_{1-y}$, а также $GaAs/Ga_xIn_{1-x}As$, $GaAs/GaP_yAs_{1-y}$, $InP/Ga_xIn_{1-x}As$[1] и др. Для достижения высокой эффективности излучательной рекомбинации полупроводниковые слои должны обладать прямозонной структурой. Применение подобных структур в инжекционных лазерах позволяет увеличить мощность излучения лазеров, уменьшить пространственную расходимость светового пучка, снизить пороговые плотности тока, благодаря чему увеличивается срок

[1]Индексы x и y определяют мольную долю соответствующих соединений в твердом растворе.

службы приборов. Управление толщиной слоев позволяет менять длину волн рекомбинационного излучения.

В случае *ковариантных* сверхрешеток (сверхрешеток 2-го типа) (рис. 3.7) разрывы валентной зоны и зоны проводимости одноименны по знаку, следовательно происходит частичное перекрытие запрещенных зон и выполняется условие:

$$\Delta Э_С - \Delta Э_В = \Delta Э_1 - \Delta Э_2.$$

Эффективная ширина запрещенной зоны в таких сверхрешетках может быть меньше запрещенной зоны узкозонного компонента. Ступенчатая структура приводит к пространственному разделению квантовых ям для электронов и дырок. Электроны локализуются в материале, имеющем меньшую работу выхода, запрещенная зона которого расположена выше по энергетической шкале. Композиции такого рода обладают непрямой зонной структурой. Излучательная рекомбинация происходит только путем туннелирования через гетерограницу.

Подобные сверхрешетки формируются на основе композиций $GaSb/Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$, $InAs/InP_xAs_ySb_{1-x-y}$, GaSb/InAs, $Ga_xIn_{1-x}As/InP_yAs_{1-y}$ и др. [4].

Модулированное легирование. Композиционные сверхрешетки с модулированным легированием позволяют создавать структуры, в которых носители заряда пространственно разделены с породившими их атомами. В квантовых ямах формируется двухмерный электронный газ, при движении которого вдоль гетерограницы в условиях низких температур имеет место высокая подвижность носителей заряда (свыше 10^6 м^2/(В·с)), объясняющаяся отсутствием рассеяния на ионизированных примесях в нелегированных областях [4].

3.3.3 Соединения типа $A^{II}B^{VI}$

Свойства. К соединениям типа $A^{II}B^{VI}$ относятся халькогениды цинка, кадмия и ртути, исключая оксиды. Они имеют кристаллическую структуру сфалерита или вюрцита (рис. 3.5). Разница между электроотрицательностями атомов соединения больше, чем в соединениях $A^{III}B^{V}$ (см. подразд. 3.3.1), поэтому ионная составляющая химической связи больше.

Независимо от условий получения и легирования, полупроводники типа $A^{II}B^{VI}$, кроме теллуридов кадмия и ртути, проявляют

электропроводность только одного типа. Сульфиды и селениды цинка, кадмия и ртути являются полупроводниками n-типа. Теллурид цинка обладает дырочной проводимостью. Это свойство накладывает ограничения на возможность применения таких соединений.

Проводимость соединений типа $A^{II}B^{VI}$ может быть значительно изменена при термообработке в пара́х собственных компонентов. Это обусловлено появлением нестехиометрических дефектов, ведущих себя подобно донорам и акцепторам [4].

Применение. Среди соединений рассматриваемого типа наиболее широко применяются сульфиды цинка — для изготовления люминофоров, сульфид кадмия — для изготовления фоторезисторов, а также селенид цинка, применяемый при производстве синих светодиодов и полупроводниковых лазеров с электронным возбуждением.

Для создания приемников дальнего ИК-излучения интересны узкозонные полупроводники типа $A^{II}B^{VI}$, в частности твердые растворы $Cd_xHg_{1-x}Te$.

Селенид и теллурид ртути применяются в высокочувствительных датчиках Холла [4].

3.3.4 Соединения типа $A^{IV}B^{VI}$

Свойства. К группе соединение $A^{IV}B^{VI}$ относятся халькогениды германия, олова и свинца. Их свойства представлены в табл. А.2.

Все соединения кристаллизуются в структуре типа NaCl, имеют ярко выраженную ионную составляющую химической связи.

Халькогениды свинца являются прямозонными полупроводниками, отличаются необычной зависимостью ширины запрещенной зоны от температуры — $\Delta Э$ возрастает с ростом температуры. В нормальных условиях подвижность электронов в соединениях халькогенов со свинцом ниже чем у алмазоподобных полупроводников с приблизительно такой же шириной запрещенной зоны, однако с понижением температуры наблюдается резкий рост подвижность носителей заряда.

Халькогениды свинца обладают высокой (на 1–2 порядка выше, чем у полупроводников типа $A^{III}B^{V}$) диэлектрической проницаемостью [4].

Получение. Халькогениды свинца выращивают из газовой фазы. Метод Чохральского не применяется, т. к. халькогениды сильно диссоциируют вблизи зоны плавления. Также выращивание из газовой фазы позволяет контролировать давление паров, что позволяет контролировать концентрацию собственных точечных дефектов [4].

Применение. Тонкие пленки халькогенида свинца обладают высокой фоточувствительностью в далекой ИК-области спектра, однако изготавливаемые фотодетекторы обладают невысоким быстродействием из-за высокой диэлектрической проницаемости.

Перспективно применение такого типа соединений в инжекционных лазерах с длиной волны от 6 до 32 мкм. Такие лазеры обладают возможностью перестраивать длину волны излучения путем изменения рабочей температуры [4].

3.3.5 Карбид кремния

Применение. Были созданы практически все классические полупроводниковые приборы на основе карбида кремния, превосходящие кремниевые аналоги по всем параметрам, кроме полного рабочего тока. Это связано с недостаточным структурным совершенством подложек из карбида кремния, из-за чего рабочая площадь приборов не превышает 3×3 мм^2. Также проблемой для внедрения полупроводниковых приборов на основе SiC является его высокая стоимость.

Преимуществом полупроводниковых приборов на основе карбида кремния является возможность работы в агрессивных средах.

Важная особенность карбида кремния — способность излучать в видимом диапазоне спектра. Используя различные политипы, а также изменяя примесный состав, можно получать любой цвет свечения — от красного до фиолетового. Благодаря этому свойству карбид кремния широко распространен в производстве светодиодов [4].

3.4 Очистка и получение монокристаллов

Метод Чохральского. *Метод Чохральского* применяется для выращивания монокристаллов различных веществ. Этот метод

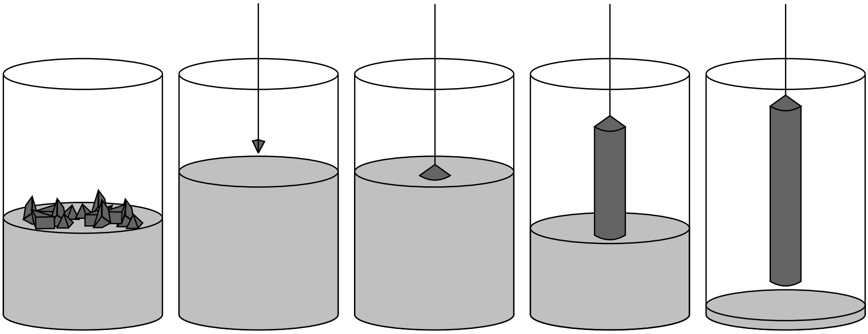


Рис. 3.8. Процесс выращивания монокристалла методом Чохральского: 1 — плавление поликристалла, легирование; 2 — опускание штока; 3 — начало роста монокристалла; 4 — вытягивание монокристалла из расплава; 5 -— готовый монокристалл с остатками расплава

обеспечивает высокое структурное совершенство получаемых монокристаллов. Схема метода показана на рис. 3.8.

Внутри герметичной камеры создается вакуум или защитная газовая атмосфера. Очищенный поликристаллический кремний помещается в разогреваемый тигель. После опускания штока производят разращивание кристалла до требуемого диаметра.

Легирующие примеси вводят в расплав. Вращение тигля и кристалла вызывает равномерное распределение примеси в расплаве.

К недостаткам метода следует отнести загрязнение кристаллов кислородом, содержащимся в кварцевом (SiO_2) тигле, и дислокации, вызванные термическими напряжениями, которые, в свою очередь, обусловлены неоднородным распределением температуры в монокристалле [2].

Метод зонной плавки. *Метод зонной плавки* основан на неодинаковой растворимости примесей в жидкой и твердой фазах, находящихся в состоянии равновесия. Отношение концентраций примесей в твердой $N_{\text{тв}}$ и жидкой $N_{\text{ж}}$ фазах называется *коэффициентом распределения* $k_0 = \frac{N_{\text{тв}}}{N_{\text{ж}}}$. Метод зонной плавки эффективен при $k_0 < 1$, т. к. в этом случае примеси оттесняются в объем расплава.

Процесс (рис. 3.9) проводят в атмосфере защитных газов. Подвергаемый очистке монокристалл помещают в графитовую лодочку. С помощью индуктора, питаемого от высокочастотного гене-

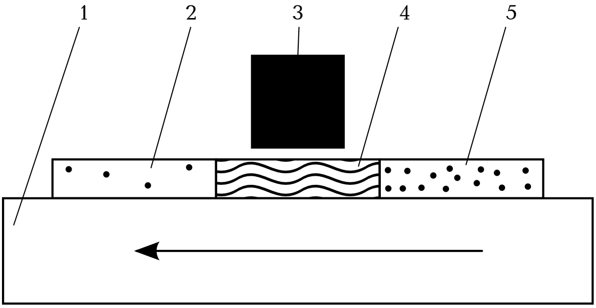


Рис. 3.9. Схема метода зонной плавки:
1 — тигель, 2 — очищенная зона с малым числом примесей, 3 — нагреватель, 4 — расплавленная зона, 5 — загрязненная зона. Стрелкой обозначено направление движения подложкодержателя с подложкой

ратора, получают узкую расплавленную зону в начале образца, которую медленно перемещают вдоль слитка. Примеси, у которых $k_0 < 1$, концентрируются в расплавленной зоне и перемещаются вместе с ней к концу слитка. Требуемая степень очистки достигается за несколько $(5\ldots8)$ проходов. Для ускорения процесса очистки создают несколько расплавленных зон.

Существуют модификации данного метода. Для химически активных в расплавленном состоянии веществ, таких как кремний, применяют *бестигельную зонную плавку*. Суть метода заключается в том, что расплавленная зона удерживается между твердыми участками слитка силами поверхностного натяжения. Такой процесс проводится в вакууме или атмосфере защитных газов. При плавке в вакууме происходит испарение примесей из расплава, что позволяет эффективно очищать образец от кислорода.

Кристаллы, выращенные методом зонной плавки, имеют содержание кислорода ниже, чем кристаллы выращенные методом Чохральского, однако уступают по однородности свойств и числу структурных дефектов [2].

3.5 Легирование полупроводников

Для создания p–n-перехода полупроводниковые материалы легируют. Легирование может осуществляться как в процессе выращивания монокристалла, так и на последующих стадиях обра-

ботки. Существует множество методов легирования полупроводниковых материало. Рассмотрим основные из них.

Диффузия. Самым простым способом является *термическая диффузия примесей* (ТДП). Диффузия имеет три механизма осуществления: обмен местами из одного равновесного состояния в другое; движение по вакансиям; движение по межузлиям.

Метод ТДП имеет ряд недостатков:

- невозможность использования легирующих материалов в чистом виде (P — взрывоопасен, As, Sb — ядовиты), используются их производные;
- для увеличения скорости процесса его приходится проводить при высоких температурах, что приводит к перераспределению ранее внедренных примесей;
- изотропность процесса приводит к боковой диффузии, что недопустимо в субмикронной технологии;
- использование многих материалов в качестве диффузанта по разным причинам ограничена;
- максимальная концентрация примеси находится на поверхности подложки [2].

Лазерное легирование. *Лазерное легирование* — процесс введения примеси при воздействии лазерного излучения. Лазерное легирование позволяет осуществить локальный нагрев участка образца, а также относительно просто производить регулировку температуры.

По способу подвода лазерного излучения различают две схемы: прямую и обратную. В *прямой схеме* лазерный луч попадает на легируемую поверхность, в *обратной схеме* облучают с обратной стороны подложки. При использовании обратной схемы энергия квантов излучения должна быть меньше, чем ширина запрещенной зоны, иначе излучение будет поглощаться подложкой.

Существуют пять способов подвода легирующей смеси.

1. Легирование из газовой фазы под действием лазерного нагрева поверхности подложки. Лазерное излучение используется только для нагрева поверхности образца, поэтому применяемое лазерное излучение, с одной стороны, должно обладать малым значением коэффициента оптического поглощения в газовой фазе, т. е. не должно быть больше энергии

диссоциации $E_{дис}$ молекул газа, а с другой стороны большим коэффициентом оптического поглощения в материале подложки:

$$E_{д} \ll h\nu \ll E_{дис}.$$

Также подложка должна обладать высокой адсорбционной способностью к атомам примеси.

2. Фотолизное лазерное легирование. Энергия лазерного излучения расходуется на диссоциацию атомов газа и нагрев поверхности подложки, поэтому она должна быть больше и энергии диссоциации, и ширины запрещенной зоны;
3. Имплантационно-лазерное легирование. Такой способ позволяет улучшить качество и дополнительно сформировать легированный слой, полученный методом ионной имплантации и лазерного отжига. Для проведения имплантационно-лазерного легирования необходимо сильное поглощение света в поверхностном слое полупроводника, для чего энергия квантов излечения должна быть больше ширины запрещенной зоны;
4. Лазерное легирование из контактного слоя. Лазерное излучение направляется на поверхность полупроводника, на которую предварительно нанесен слой легирующего вещества. При большой толщине слоя трудно обеспечить высокую температуру на контактной границе, при малой толщине не достигается необходимая глубина легированного слоя, что является недостатками способа;
5. Лазерная имплантация примесей осуществляется по обратной схеме, что позволяет использовать лазеры существенно меньшей мощности. При этом удается осуществить плавление контактной области, диффузию и имплантацию. Для проведения легирования по этому методу необходимо использовать полупроводники с низким содержанием примесей, т. к. они вызывают поглощение энергии лазерного излечения в легируемом образце [2].

Ионное легирование. *Ионное легирование* — процесс внедрения примесей в подложку путем бомбардировки ее поверхности ионами примесей (рис. 3.10). Энергия ионам сообщается электрическим полем напряжением в сотни киловольт.

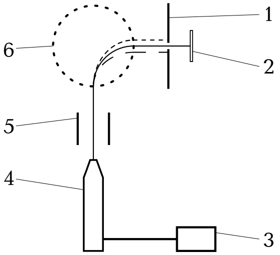


Рис. 3.10. Схема установки для ионного легирования:
1 — диафрагменная щель, 2 — подложка, 3 — источник высокого напряжения, 4 — источник ионов, 5 — фокусирующая система, 6 — магнитный сепаратор

Преимуществами этого метода являются низкие рабочие температуры, большое число применяемых примесей, возможность точного управления концентрацией примеси, относительная простота управления профилем распределения внедренных ионов легирующих примесей [2].

Радиационное легирование. Большими возможностями обладает метод *радиационного легирования*, которое происходит под действием потока нейтронов, направленного на кристалл и обладающего большой проникающей способностью. Это позволяет получать монокристаллы с однородным распределением примесей. Данный метод применяется в основном для получения высокоомных кристаллов кремния.

В природном кремнии содержится 3,09% устойчивого изотопа $^{30}_{14}\mathrm{Si}$. При облучении потоком нейтронов такой изотоп превращается в нестабильный изотоп $^{31}_{14}\mathrm{Si}$ (имеющий период полураспада всего 9438 с), который в свою очередь превращается в устойчивый изотоп $^{31}_{15}\mathrm{P}$:

$$^{30}_{14}\mathrm{Si} + n^0 \ \rightarrow \ ^{31}_{14}\mathrm{Si} \ \rightarrow \ ^{31}_{15}\mathrm{P} + e^- .$$

Для «залечивания» образовавшихся дефектов применяют высокотемпературный отжиг [4].

3.6 Методы получения тонких пленок

Эпитаксией называется процесс роста слоев, решетка которых определенным образом ориентирована относительно исход-

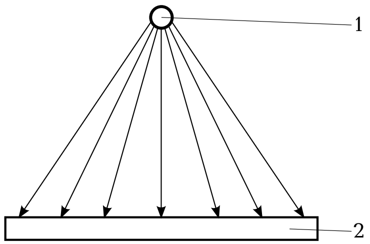


Рис. 3.11. Схема метода ТВН:
1 — испаритель, 2 — подложка. Стрелками обозначены радиус-векторы от испарителя к подложке

ного кристалла-подложки, который играет роль затравки. Растущие слои ориентируются с некоторым соответствием по отношению к соприкасающейся атомарной плоскости, т. к. в этом случае свободная энергия будет минимальна. Рост пленки осуществляется при температурах меньших температуры плавления. Если материалы подложки и наращеваемого материала идентичны, то процесс называют *гомоэпитаксиальным*; если различны — *гетероэпитаксиальным*[1]. Подложка и выращиваемый слой могут иметь различные типы проводимости. Это позволяет создавать p–n-переходы [2].

Термическое вакуумное напыление. Процесс *термического вакуумного напыления*[2] (рис. 3.11) можно разделить на три этапа:

1. нагрев в вакууме наносимого вещества до температуры испарения;
2. транспортирование пара от испарителя к подложке;
3. конденсация испаряемого вещества на подложке:

    3.1. Зарождение зерен. Первым этапом конденсации пленок является адсорбция. Адсорбированные атомы сначала статистически распределены по поверхности, затем локализуются на участках с неоднородностями структуры поверхности (примеси, дефекты и т. п.).

[1] В этом случае кристаллические структуры слоя и подложки быть сходными.
[2] Можно встретить другое название — PVD-процесс (англ. PVD — physical vapour deposition — физическое осаждение пара).

- островковый режим — осаждаемые атомы связаны друг с другом сильнее, чем с подложкой;
- послойный режим — осаждаемые атомы связаны с подложкой сильнее, чем между собой;
- промежуточный режим — сначала происходит послойной рост, затем начинается островковый режим роста.

3.2. Рост зерен. Вокруг зерен растут островки, являющиеся жидкими каплями или монокристаллами.

3.3. Объединение островков. При контакте граница островков разрушается, от выделившейся теплоты островки расплавляются, а при охлаждении образуют монокристалл. Межсоединения островков образуют сеть с пустотными каналами.

3.4. Заполнение каналов [2].

Молекулярно-пучковая эпитаксия. По своей сути, МПЭ аналогична методу термического вакуумного напыления. Однако позволяет осуществлять прецизионный контроль процесса и получаемой структуры. Схема установки показана на рис. 3.12.

Процесс происходит в высоком вакууме — не ниже 10^{-8} Па. Благодаря этому распространение молекулярных пучков происходит по прямолинейным траекториям. Интенсивность испарения зависит от температуры нагревателей в испарительных ячейках. С помощью заслонок можно практически мгновенно прекратить поступление вещества на подложку. Преимуществами такого метода являются:

- низкие скорости роста (порядка 1 мкм/час) — позволяют менять состав и концентрацию примесей в пределах моноатомного слоя;
- сравнительно низкие температуры роста;
- возможность получения резких профилей распределения компонентов состава и легирующих примесей;
- совместимость с другими технологическими процессами;
- возможность диагностики свойств эпитаксиальных пленок [2].

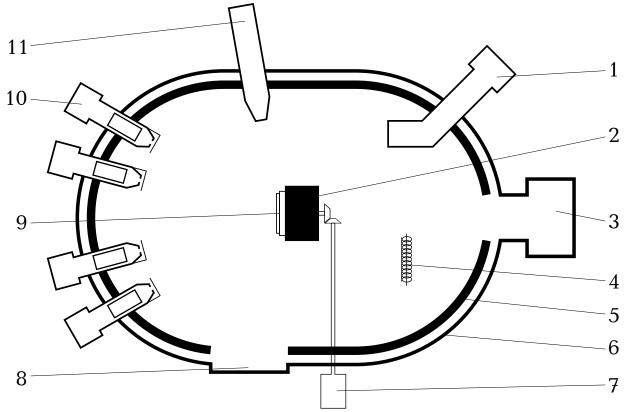


Рис. 3.12. Схема установки для проведения молекулярно-пучковой эпитаксии:
1 — масс-спектрометр, 2 — нагреватель, 3 — насосы, 4 — ионизационный датчик, 5 — криопанели (позволяют уменьшить газоотделение от стенок камеры), 6 — корпус вакуумной камеры, 7 — устройство вращения подложки, 8 — флуоресцентный экран, 9 — подложкодержатель с подложкой, 10 — испарительные ячейки с заслонками, 11 — электронная пушка (картина дифракции электронов, отраженных от образца позволяет следить за различными параметрами роста в реальном времени)

Эпитаксия из газовой фазы. Для эпитаксии из газовой фазы[1] используется установка (рис. 3.13), содержащая реактор, через который прокачивается смесь инертного газа-носителя (как правило, водород) и газа-реагента. Подложки, на которые необходимо осадить пленку нагреваются до температуры, при которой газ-реагент разлагается, образуя в качестве твердого продукта атомы полупроводника, которые осаждаются на подложку. Такой процесс называется *пиролизом*. Например, для кремния в качестве газа реагента используют силан ($SiCl_4$):

$$\mathrm{SiCl_4} + 2\,\mathrm{H_2} \rightleftarrows \mathrm{Si}\downarrow + 4\,\mathrm{HCl}\uparrow.$$

Для легирования в смесь газов добавляют гидриды примесных элементов [2].

Жидкостная эпитаксия. Жидкостная эпитаксия по сути является методом Чохральского. Однако метод Чохральского не

[1]Можно встретить другое название — CVD-процесс (англ. CVD — chemical vapour deposition — химическое осаждение пара).

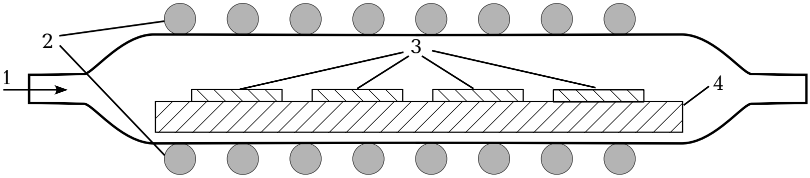


Рис. 3.13. Схема установки для эпитаксии из газовой фазы:
1 — смесь газов; 2 — нагреватели; 3 — подложки; 4 — подложкодержатель

обеспечивает прецизионного контроля за параметрами процесса.

Для улучшения контроля применяют жидкостную эпитаксию, управляемую электрическим током (рис. 3.14). При этом через выращиваемый слой пропускают электрический ток. Вследствие эффекта Пельтье происходит охлаждение или нагрев границы раздела расплава и подложки. Контролируя величину протекающего тока и полярность, можно получать качественные пленки [2].

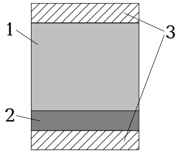


Рис. 3.14. Схема установки для жидкостной эпитаксии, управляемой электрическим током:
1 — расплав; 2 — подложка; 3 — электрические контакты

Глава 4

Диэлектрические материалы

4.1 Основные понятия о диэлектриках

Условно к диэлектрикам относят материалы с удельным электрическим сопротивлением $\rho > 10^8$ Ом·м. С точки зрения зонной теории, диэлектриками условно называют вещества с шириной запрещенной зоны превышающей 3 эВ.

Характерными особенностями диэлектриков являются поляризация в электрическом поле, высокое удельное сопротивление, незначительное рассеяние электрического поля, электрическая прочность [4].

4.1.1 Поляризация диэлектриков

Основные понятия. При приложении электрического поля к диэлектрику, не происходит переноса свободных носителей заряда, т. к. их концентрация ничтожно мала. Однако при этом происходит смещение связанных зарядов, вызывающее появление поляризованного состояния (рис. 4.1).

Поляризацией называют состояние диэлектрика, характеризующееся наличием электрического момента у любого элемента его объема.

Различают поляризацию, возникающую под действием внешнего электрического поля, и спонтанную (самопроизвольную), су-

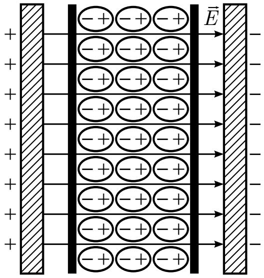


Рис. 4.1. Поляризация бесконечного плоского диэлектрика

ществующую в отсутствие поля. В некоторых случаях поляризация диэлектриков появляется под действием механических напряжений.

Способность различных материалов поляризоваться в электрическом поле характеризуется относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = C_{\text{д}}\, C_0$, где $C_{\text{д}}$ — емкость конденсатора с данным диэлектриком, C_0 — емкость того же конденсатора в вакууме (т. е. геометрическая емкость между электродами).

Абсолютная диэлектрическая проницаемость ε_α связана с относительной диэлектрической проницаемостью: $\varepsilon_\alpha = \varepsilon_0\, \varepsilon$, где $\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная.

Количественной характеристикой поляризации служит поляризованность диэлектрика. Поляризованностью P называют векторную физическую величину, равную отношению электрического момента dp элемента диэлектрика к объему dV этого элемента и выражаемую в Кл/м^2: $P = dp/dV$ [3].

Механизмы поляризации. Существуют различные механизмы поляризации:

- Электронная поляризация представляет собой упругое смещение и деформацию электронных оболочек атомов и ионов (рис. 4.2). Самая быстрая поляризация (до 10^{-15} с). Не связана с потерями.
- Ионная поляризация обусловлена смещением упруго связанных ионов из положения равновесия на расстояния, меньшие периода кристаллической решетки. Время протекания — порядка 10^{-13} с. Потерь нет.
- Дипольно-релаксационная поляризация происходит под дей-

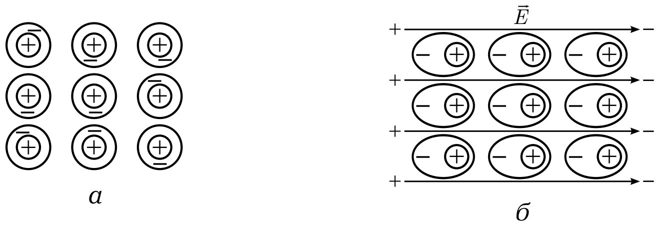


Рис. 4.2. Деформация электронных оболочек атомов при поляризации диэлектриков:
а — при отсутствии электрического поля; *б* — при приложении электрического поля

ствием электрического поля, которое вызывает преимущественную ориентацию диполей (рис. 4.3). Протекает с потерями на преодоление сил связи и внутреннего трения. Более медленная по сравнению с электронной и ионной поляризацией. После снятия поля, частицы постепенно разориентируются. Характерна для жидкостей, состоящих из полярных молекул.

- Ионно-релаксационная поляризация наблюдается в ионных диэлектриках с неплотной упаковкой ионов, например в неорганических стеклах. В этом случае слабо связанные ионы смещаются на расстояния, превышающие постоянную решетки. После снятия электрического поля ионы постепенно возвращаются к центрам равновесия.
- Электронно-релаксационная поляризация возникает за счет ориентации избыточных «дефектных» электронов и дырок в электрическом поле.
- Резонансная поляризация — ориентация частиц, собственные частоты которых совпадают с частотами внешнего электрического поля.
- Миграционная поляризация обусловлена наличием в материале слоев с различной проводимостью, образованием объемных зарядов, имеет большие потери и является поляризацией замедленного действия.
- Спонтанная (самопроизвольная) поляризация существует только у сегнетоэлектриков (см. раздел 4.3.1) [3].

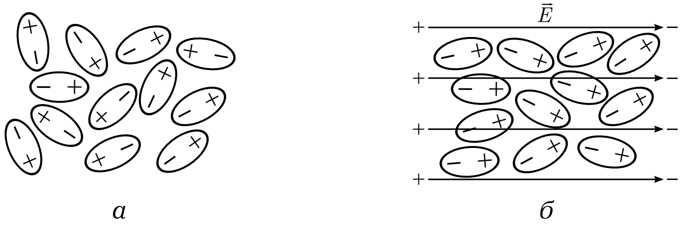


Рис. 4.3. Схема дипольно-релаксационной поляризации:
а — в отсутствие электрического поля; *б* — при воздействии электрического поля

Классификация диэлектриков по механизмам поляризации.

- Линейные диэлектрики (имеющие линейную зависимость заряда конденсатора от напряжения).
  - Неполярные диэлектрики — газы, жидкости и твердые вещества, обладающие в основном только электронной поляризацией. К ним относятся водород, бензол, сера, полиэтилен.
  - Полярные диэлектрики — органические жидкие, полужидкие и твердые вещества, имеющие одновременно электронную и дипольно-релаксационную поляризации. К ним относятся кремнийорганические соединения, капрон, фенолформальдегидные смолы.
  - Ионные диэлектрики. В этой группе целесообразно выделить две подгруппы материалов:
    - диэлектрики с ионной и электронной поляризациями (кварц, слюда, корунд, TiO_2);
    - диэлектрики с ионной, электронной и релаксационной поляризацией (неорганические стекла, керамика).
- Нелинейные диэлектрики (зависимость заряда от напряжения принимает форму петли гистерезиса). К этому классу диэлектриков относятся только сегнетоэлектрики (вещества, обладающие спонтанной поляризацией) [3].

4.1.2 Токи смещения, электропроводность

При поляризации происходит смещение зарядов в веществе, что обуславливает появление токов в диэлектрике, называемых *токами смещения.*

При электронной и ионной поляризациях, токи смещения кратковременны, их обычно не удается зафиксировать прибором. Токи смещения при замедленной поляризации, наблюдаемые у многих технических диэлектриках, называются *абсорбционными токами* $I_{\text{абс}}$.

При постоянном напряжении абсорбционные токи проходят только в периоды коммутации. При переменном напряжении они имеют место в течении всего времени приложения электрического поля.

Наличие небольшого количества свободных носителей зарядов, а также их инжекция из электродов, обуславливает возникновение небольшого *сквозного тока* $I_{\text{скв}}$. После завершения процессов поляризации через диэлектрик проходит только сквозной ток.

Таким образом, плотность тока в диэлектрике (*тока утечки*) $J_{\text{ут}}$ является суммой плотностей абсорбционного $J_{\text{абс}}$ и сквозного $J_{\text{скв}}$ токов:

$$J_{\text{ут}} = J_{\text{абс}} + J_{\text{скв}}.$$

Плотность тока смещения определяется скоростью изменения электрической индукции $\vec{D}$, включающие в себя мгновенные (электронное, ионное) и замедленные смещения зарядов:

$$J_{\text{см}} = \frac{d\vec{D}}{dt} = J_{\text{абс}}.$$

В слабых электрических полях носителями зарядов в диэлектриках в большинстве случаев являются ионы. В сильных электрических полях, в связи с процессами ударной ионизации, начинает преобладать электронная проводимость.

Сопротивление диэлектрика (сопротивление изоляции) $R_{\text{из}}$, заключенного между двумя пластинами, к которым приложено напряжение U, вычисляется по формуле:

$$R_{\text{из}} = \frac{U}{I_{\text{ут}} - \sum I_{\text{пол}}},$$

где $\sum I_{\text{пол}} = I_{\text{абс}}$ — сумма токов, вызванных замедленными механизмами поляризации.

У твердых диэлектриков различают *объемную* и *поверхностную электропроводности*. Для оценки этих величин используют удельное объемное ρ_{V} и удельное поверхностное ρ_{S} сопротивления.

Удельное объемное сопротивление ρ_{V} находят по формуле:

$$\rho_{\mathrm{V}} = R\frac{S}{h},$$

где R — объемное сопротивление, S — площадь электрода, h — толщина образца.

Удельное поверхностное сопротивление ρ_{S} рассчитывают по формуле:

$$\rho_{\mathrm{S}} = R_{\mathrm{S}}\frac{d}{l},$$

где R_{S} — поверхностное сопротивление образца между параллельно поставленными электродами шириной d, отстоящими друг от друга на расстояние l.

Полная проводимость твердого диэлектрика есть сумма объемной и поверхностной проводимостей:

$$\frac{1}{R_{\text{из}}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R_{\mathrm{S}}}.$$

Величина, характеризующая время, в течении которого напряжение на обкладках конденсатора, отключенного от питания, уменьшается вследствие разрядки в e раз, называется *постоянной времени* τ_0:

$$\tau_0 = R_{\text{из}}\,C = 8{,}85 \cdot 10^{-12}\,\rho\,\varepsilon.$$

При длительной работе под напряжением сквозной ток через твердые или жидкие диэлектрики с течением времени может уменьшаться или увеличиваться. К уменьшению приводит электрическая очистка материала от ионов посторонних примесей. Увеличение говорит о старении материала, которое вызывает рост концентрации свободных носителей заряда.

4.1.3 Диэлектрические потери

Диэлектрическими потерями называют электрическую мощность, затрачиваемую на нагрев диэлектрика, находящегося в электрическом поле.

Для характеристики способности диэлектрика рассеивать энергию в электрическом поле используют угол диэлектрических потерь и тангенс этого угла.

Углом диэлектрических потерь δ называют угол, дополняющий до 90° угол сдвига фаз φ между током и напряжением в емкостной цепи.

Чем больше рассеивается мощность в диэлектрике, тем меньше угол сдвига фаз φ и тем больше угол диэлектрических потерь δ.

Тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ характеризует отношение активной составляющей проводимости к емкостной составляющей.

Виды диэлектрических потерь.

- Потери на электропроводность. Потери этого вида свойственны диэлектрикам, обладающим заметной электропроводностью. Значение тангенса угла диэлектрических потерь может быть найдено по формуле

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{1{,}8 \cdot 10^{10}}{\varepsilon\, f\, \rho}, \tag{4.1}$$

  где ε — диэлектрическая проницаемость, f — частота, ρ — удельное электрическое сопротивление диэлектрика.

- Релаксационные потери. Такой вид потерь характерен для диэлектриков с замедленными видами поляризации, проявляются при высоких частотах электрического поля, когда сказывается отставание поляризации от изменения поля. Релаксационные потери зависят от времени релаксации τ_0 и периода изменения поля:

  – при $\tau_0 \ll \frac{1}{\omega}$, происходит полная поляризация, потерь практически нет;

  – при $\tau_0 \gg \frac{1}{\omega}$, происходит незначительная поляризация, потери низки;

  – при $\tau_0 \approx \frac{1}{\omega}$, время поляризации сравнимо с периодом изменения поля, потери максимальны.

- Ионизационные потери. Данный вид потерь наблюдается в газах и пористых твердых диэлектриках. Тангенс угла диэлектрических потерь можно найти по формуле (4.1). Активные ионизационные потери в порах можно приближенно

рассчитать по формуле:

$$P_{\text{а. и}} = A_1 f\,(U - U_{\text{и}})^3\,,$$

где A_1 — эмпирическая константа, $U_{\text{и}}$ — пороговое напряжение ионизации.

Ионизационные потери приводят к разогреву пор.

- Резонансные потери. Резонансные потери связаны с резонансной поляризацией, проявляются при совпадении частоты электрического поля с собственной частотой колебания осцилляторов. Фактически в этих условиях конденсатор ведет себя как активное сопротивление.
- Потери на гистерезис. Характерны только для сегнетоэлектриков, которым свойственна доменная поляризация, сопровождающаяся в переменных полях диэлектрическим гистерезисом. Потери на гистерезис существуют до точки Кюри.

4.2 Пассивные полимеры

4.2.1 Основные сведения о полимерах

Полимеры — высокомолекулярные соединения, получаемые путем многократного повторения различных групп атомов, называемых «мономерами», соединенных в длинные макромолекулы химическими или координационными связями. Реакцию образования полимера из мономеров называют *полимеризацией*. Полимеризация соединений с двойными связями, как правило, протекает по цепному механизму. Для начала цепной реакции необходимо, чтобы в исходной инертной массе зародились активные частицы. В цепных реакциях одна активная частица вовлекает в реакцию тысячи неактивных молекул, образующих длинную цепь. Первичными активными центрами являются свободные радикалы и ионы. *Радикалы* — это части молекулы, образующиеся при разрыве электронной пары и содержащие неспаренный электрон (например, метил CH_3—, фенил C_6H_6—, этиловая группа C_2H_5— и т. д.). Образование первоначальных радикалов и ионов может происходить под действием теплоты, света, различных ионизирующих излучений, специально вводимых катализаторов.

Помимо реакции полимеризации могут быть более сложные случаи образования высокомолекулярного соединения. Такова,

например, *поликонденсация* — реакция, связанная с перегруппировкой атомов полимеров и выделением из сферы реакции воды или других низкомолекулярных веществ. Полимеры, полученные путем поликонденсации, как правило, обладают пониженными электрическими свойствами по сравнению с материалами, полученными по реакции полимеризации. Основной причиной этого является наличие в поликонденсационных диэлектриках остатков побочных низкомолекулярных веществ (воды, кислот, спирта), которые, распадаясь на ионы, увеличивают проводимость материала [3].

Классификация полимеров по форме макромолекул. В зависимости от пространственной структуры макромолекул полимеры делят на два основных типа — линейные, разветвленные и пространственные.

- Линейные полимеры — это соединения, макромолекулы которых представляют собой длинные цепи, молекулы которых химически инертны по отношению друг к другу и связаны между собой лишь силами Ван-дер-Ваальса.
- Разветвленные полимеры образованы цепями с боковыми ответвлениями (число ответвлений и их длина различны). Разветвленные полимеры более прочны, чем линейные.
- Пространственные полимеры содержат реакционно-способные группы, которые при нагревании соединяются множеством прочных поперечных связей и полимер оказывается сшитым.

Линейные и разветвленные полимеры размягчаются (плавятся) при нагревании и вновь затвердевают при охлаждении. Такое свойство полимеров называется термопластичностью, а сами полимеры — термопластичными, или термопластами. Термопластичные полимеры можно не только плавить, но и растворять, так как связи Ван-дер-Ваальса легко рвутся под действием реагентов. К термопластам относятся поливинилхлорид, полиэтилен, полистирол и др. Пространственные полимеры при нагревании остаются твердыми, а при достижении температуры плавления разрушаются [3].

Структурные формы и состав полимерных цепей. Макромолекулы могут быть регулярными и нерегулярными. Полимер построен регулярно, если соблюдается совершенный дальний порядок расположения звеньев по цепи. Гибкие нерегулярные мак-

ромолекулы имеют тенденцию сворачиваться в сфероподобные структуры, называемые глобулами. Поверхность глобулы намного меньше поверхности вытянутой макромолекулы, поэтому межмолекулярное взаимодействие при контакте глобул оказывается слабым. Глобулярной структурой объясняется непрочность некоторых органических полимеров.

Жестким полимерным цепям трудно сворачиваться в глобулы. За счет сил межмолекулярного взаимодействия несколько соседних макромолекул могут организоваться в пачки (пучки параллельных молекул). Полимеры с гибкими макромолекулами регулярного строения обладают способностью образовывать кристаллическую фазу, которая характеризуется упорядоченным расположением молекул. В кристаллической фазе обычно наблюдается складывание молекулярных цепей, т. е. их изгиб через определенные интервалы под углом 180° и встраивание в плоскости в виде гармошки. При кристаллизации сильно разбавленных растворов можно получить небольшие пластинчатые кристаллы некоторых полимеров (например, полиэтилена). В кристаллическом полимере макромолекулы плотно упакованы и им трудно проявлять свою гибкость. Такие полимеры обычно являются жесткими материалами с высоким модулем упругости и малой деформируемостью.

По химическому составу полимеры можно разделить на органические и элементоорганические. К органическим полимерам относят такие высокомолекулярные соединения, у которых главная цепь состоит из углерода или комбинации углерода с кислородом, азотом, серой и фосфором.

Элементоорганическими называют такие полимеры, главная цепь которых не содержит атомов углерода, но обрамляется органическими группами. Наиболее распространенными представителями этих материалов являются кремнийорганические соединения (полиорганосилоксаны) [3].

Электрические свойства полимеров Строение макромолекул во многом определяет электрические свойства полимеров. Все химические связи углерода с другими элементами в той или иной степени полярны из-за различия электроотрицательностей атомов, участвующих в связи. Суммарный дипольный момент молекулы определяется векторной суммой дипольных моментов отдельных связей. Если молекула имеет симметричное строение, то дипольные моменты отдельных связей могут уравновешивать друг друга, благодаря чему суммарный дипольный момент равен нулю.

Вещества с несимметрично построенными звеньями полимерных молекул являются дипольными и обычно обладают невысокими или средними электрическими характеристиками. Высокомолекулярные углеводороды с симметрично построенными молекулами практически неполярны или слабополярны, и они имеют малое значение тангенса угла диэлектрических потерь и низкую удельную проводимость. [3]

4.2.2 Линейные полимеры

Линейные полимеры — это соединения, макромолекулы которых представляют собой длинные цепи, молекулы которых химически инертны по отношению друг к другу и связаны между собой лишь силами Ван-дер-Ваальса.

Неполярные полимеры — полимеры, у которых мономерные звенья макромолекул не обладают дипольным моментом. Наиболее важное значение из них имеют полиэтилен, полипропилен, полистирол, политетрафторэтилен (фторопласт-4). Эти полимеры имеют наибольшее техническое значение из материалов, получаемых полимеризацией.

Полярные полимеры — полимеры, у которых из-за асимметрии строения молекул сильно выражена дипольно-релаксационная поляризация. Поэтому они обладают более высокими диэлектрическими потерями, чем неполярные полимеры (особенно на высоких частотах), и бóльшими значениями диэлектрической проницаемости. Удельное поверхностное сопротивление этих материалов сильно зависит от влажности окружающей среды [4].

4.2.3 Композиционные порошковые пластмассы

Композиционные порошковые пластмассы предназначены для изготовления изделий методом горячего прессования или литья под давлением, и состоят из связующего вещества (искусственные смолы — пространственные или линейные полимеры) и наполнителей (древесная мука, очесы хлопчатника, каолин, кварцевый песок, асбестовое или стеклянное волокно и т. д.). Кроме того, в массу добавляют красители и для получения наилучших технологических свойств — пластификаторы. Наполнитель удешевляет пластмассу и в то же время улучшает механические характеристики изделия. В ряде случаев при введении наполнителя (напри-

мер, кварцевой муки, талька и др.) наблюдается улучшение электрических свойств диэлектриков. При массовом производстве изделий одинаковой формы и размеров применение пластических масс обеспечивает высокую производительность труда.

В качестве связующего вещества используют феноло-формальдегидные, крезоло-формальдегидные, анилино-формальдегидные, карбамидо-формальдегидные, меламино-формальдегидные, фурфурольные, кремнийорганические и другие смолы. Наилучшими электрическими свойствами среди композиционных пластмасс обладают материалы на основе анилино-формальдегидной смолы.

Применение композиционных пластмасс в радиоэлектронике в качестве электроизоляционных и чисто конструкционных материалов очень широко: из них изготавливают корпусы радиоприемников, телевизоров, измерительных приборов, наушники, ламповые панельки, клеммные щитки, головки кнопок, рукоятки, штепсельные разъемы и др. Изготовление таких изделий обычной механической обработкой было бы весьма трудоемко, прессование же из пластмассы позволяет получить их за одну технологическую операцию.

Слоистые пластики — разновидность композиционных пластмасс, в которых в качестве наполнителя используют листовые волокнистые материалы. К слоистым пластикам относятся гетинакс и текстолит.

- Гетинакс получают горячей прессовкой бумаги, пропитанной феноло-формальдегидной смолой или другими смолами этого же типа. Широко используется для дешевого изготовления плат в низковольтной бытовой аппаратуре.
- Текстолит — пластик, аналогичный гетинаксу, но его изготавливают из пропитанной хлопчатобумажной ткани. Среди слоистых пластиков обладает наибольшей способностью поглощать вибрационные нагрузки, хорошо сопротивляться раскалыванию. Текстолит и стеклотекстолит (на основе стеклоткани) очень широко используют в качестве основы для изготовления печатных плат современных компьютеров [3].

4.2.4 Электроизоляционные компаунды

Компаундами называют смеси различных изоляционных веществ (смол, битумов, эфиров, масел и т. д.), которые в момент

применения находятся в жидком состоянии и твердеют после охлаждения или в результате происходящих в них химических процессов.

Классификация компаундов по назначению. По назначению электроизоляционные компаунды делятся на пропиточные и заливочные:

- Пропиточные компаунды служат для заполнения пор, капилляров и воздушных включений в электроизоляционных материалах, используемых главным образом, для обмоток электрических машин, катушек аппаратов, трансформаторов и других электротехнических конструкций. После пропитки повышается электрическая прочность материала и всей конструкции в целом, улучшаются теплопроводность, теплоотдача обмоток, что позволяет увеличить мощность электрических машин и аппаратов при тех же размерах, увеличиваются механическая прочность, влагостойкость, срок службы всей конструкции.
- Заливочные компаунды используют для заполнения сравнительно больших полостей, промежутков между различными деталями, для защиты изоляции от увлажнения, для увеличения пробивного напряжения, для улучшения теплоотвода, повышения механической прочности и т. д. [3].

Классификация компаундов по отношению к нагреванию. По отношению к нагреванию электроизоляционные компаунды делятся на термопластичные и термореактивные:

- Термопластичные компаунды, твердые при нормальной температуре, при нагревании размягчаются, становятся пластичными и переходят в жидкое состояние. При охлаждении снова затвердевают. Расплавление и отвердевание этой группы компаундов можно производить многократно. Для изготовления этих компаундов часто применяются нефтяные битумы в сочетании с растительными и минеральными маслами, канифолью и некоторыми термопластичными полимерами. К их числу относятся битумные компаунды.
- Термореактивные компаунды в момент их применения находятся в жидком состоянии, а затем затвердевают в результате происходящих в них химических реакций. Отвердевание компаундов этой группы происходит под действием отвер-

дителя или катализатора. После отвердевания компаунд становится твердым, неплавким и не растворимым в обычных растворителях. Эта группа компаундов также делятся на компаунды горячего и холодного отвердевания. Компаунды горячего отвердевания переходят в твердое состояние при специальной термической обработке, а компаунды холодного отвердевания переходят в твердое состояние под действием отвердителей. Из термореактивных компаундов наиболее широкое распространение в электронной технике получили эпоксидные компаунды, отличающиеся высокой механической прочностью, высокой нагревостойкостью, а также хорошими электрическими свойствами. Однако, при работе с эпоксидными компаундами следует помнить, что в неотвердевшем состоянии смолы, а также пары́ отвердителей являются токсичными веществами, поэтому необходимо защищать от попадания смолы открытые участки кожи лица и рук, а технологический процесс проводить под вытяжкой. Отвердевшие эпоксидные композиции не токсичны.

Компаунды широко применяют для пропитки и заливки отдельных узлов электро- и радиоаппаратуры: трансформаторов, дросселей, конденсаторов. Их используют также для герметизации и опрессовки дискретных полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Некоторые разновидности эпоксидных компаундов обладают высокой оптической однородностью и прозрачностью к излучению в видимой и ближней инфракрасной областях спектра. Благодаря этим свойствам они находят применение в качестве оптических согласующих (иммерсионных) сред при выводе излучения из светодиодов [3].

4.2.5 Неорганические стекла

Стекла — неорганические квазиаморфные твердые вещества, в которых при наличии ближнего порядка отсутствует дальний порядок в расположении частиц.

По химическому составу неорганические стекла подразделяют на элементарные, халькогенидные и оксидные. Свойства диэлектриков проявляют лишь оксидные стекла. Основу оксидного стекла составляет стеклообразующий окисел. К числу стеклообразующих окислов относятся SiO_2, B_2O_3, GeO_2, P_2O_5. Наибольшее распространение получили силикатные стекла (т. е. на основе

SiO_2) благодаря высокой химической устойчивости, а также дешевизне и доступности сырьевых компонентов. Для придания определенных физических свойств, а также из технологических соображений в состав силикатных стекол вводят окислы различных металлов (наиболее часто — щелочных и щелочно-земельных).

Сырьем для изготовления стекол служат следующие материалы: кварцевый песок SiO_2, сода Na_2CO_3, поташ K_2CO_3, известняк $CaCO_3$, доломит $CaCO_3{\cdot}MgCO_3$, сульфат натрия Na_2SO_4, бура $Na_2B_4O_7$, борная кислота H_3BO_3, сурик Pb_3O_4, полевой шпат $Al_2O_3{\cdot}6\,SiO_2{\cdot}K_2O$ и др.

Сырьевые материалы измельчают смешивают и загружают в стекловарочную печь. В результате образуется однородная стекломасса, которая и идет на выработку листового стекла или стеклянных изделий.

Формовку изделий из стекла осуществляют путем выдувания, центробежного литья, вытяжки, прессования, отливки и т. п. Необходимо отметить, что стеклообразное состояние материала получается лишь при быстром охлаждении стекломассы. В случае медленного охлаждения начинается частичная кристаллизация, и стекло теряет прозрачность из-за нарушения однородности [3].

Классификация стекол по химическому составу. Силикатные стекла по составу можно разделить на три группы:

- Бесщелочные стекла (отсутствуют окислы натрия и калия). В эту группу входит число кварцевое стекло (плавленый кварц). Стекла данной группы обладают высокой нагревостойкостью, высокими электрическими свойствами, но из них трудно изготавливать изделия, особенно сложной конфигурации и с малыми допусками по размерам.
- Щелочные стекла без тяжелых окислов или с незначительным их содержанием. Эта группа стекол состоит из двух подгрупп:
  - натриевые;
  - калиевые и калиево-натриевые. В эту группу входит большинство обычных стекол. Они отличаются пониженной нагревостойкостью, легко обрабатываются при нагреве («технологичны»), но имеют пониженные электрические свойства.
- Щелочные стекла с высоким содержанием тяжелых окис-

лов (например, силикатно-свинцовые и бариевые). Эти стекла, обладая удовлетворительной обрабатываемостью, имеют повышенные электрические свойства, приближающиеся при нормальной температуре к электрическим свойствам стекол первой группы [3].

Классификация стекол по техническому назначению

- Электровакуумные стекла. Используются при изготовлении электронных ламп, электронно-лучевых и рентгеновских трубок, фотоумножителей, счетчиков частиц, ламп накаливания, газоразрядных ламп, галогенных ламп, импульсных источников света и т. д. Электровакуумные стекла должны иметь высокие диэлектрические характеристики и (во избежание растрескивания спаев) согласованный с металлами (или стеклами) коэффициент теплового расширения. Относятся к группе боросиликатных или алюмосиликатных стекол с добавками щелочных окислов.
- Изоляторные стекла.Стекла легко металлизируются и используются в качестве герметизированных вводов в металлические корпусы различных приборов (конденсаторов, диодов, транзисторов и др.). Другим элементом изоляции, часто встречающимся в дискретных полупроводниковых приборах, является стеклянная буса, изолирующая металлические выводы прибора от фланца корпуса, на котором располагается полупроводниковый кристалл с p–n-переходами. Обычно в качестве материала для таких изоляторов используют щелочное силикатное стекло.
- Цветные стекла. При добавлении некоторых веществ придают силикатным стеклам соответствующую окраску: CaO — синюю, Cr_2O_3 — зеленую, MnO_2 — фиолетовую и коричневую, UO_3 — желтую, Na_2SeO_3 — розовую, что используется при изготовлении светофильтров, эмалей и глазурей.
- Лазерные стекла. Стекло может быть использовано в качестве рабочего тела в твердотельных лазерах. Активными примесями служат чаще всего ионы Nd_{3+}, концентрация которого может достигать 6%. Достоинством таких стекол, кроме высокой концентрации активных частиц, является возможность изготовления активных элементов больших размеров (до 1,8 м длиной и до 70 мм диаметром) практически

любой формы с очень высокой оптической однородностью. Недостатки — невысокая монохроматичность выходного излучения и низкая теплопроводность.

- Стекловолокно — волокно из тонких стеклянных нитей. Его получают из расплавленной стекломассы методом вытяжки через фильеру с последующей быстрой намоткой на бобину. В такой форме стекло демонстрирует необычные для стекла свойства: не бьется и не ломается, а вместо этого легко гнется без разрушения. Это позволяет ткать из него стеклоткань, изготавливать гибкие световоды и т. д. Основными достоинствами стекловолокна являются высокая механическая прочность, высокая термостойкость, негорючесть, малая гигроскопичность и хорошие электроизоляционные свойства. Для производства стекловолокна используют щелочные алюмосиликатные, бесщелочные и малощелочные алюмоборосиликатные стекла [3].

4.2.6 Ситаллы

Ситаллы — это стеклокристаллические материалы, получаемые путем почти полной стимулированной кристаллизации стекол специально подобранного состава. Они занимают промежуточное положение между обычными стеклами и керамикой. По внешнему виду ситаллы представляют собой плотные материалы белого и от светло-бежевого до коричневого цвета. Они отличаются повышенной механической прочностью, могут иметь как очень маленький, так и большой коэффициент линейного расширения, высокую теплопроводность и удовлетворительные электрические характеристики.

Технология получения ситалла состоит из нескольких операций. Сначала получают изделие из стекломассы теми же способами, что и из обычного стекла. Затем его подвергают чаще всего двухступенчатой термической обработке при температурах 500–700°C и 900–1100°C. На первой ступени происходит образование зародышей кристаллизации, на второй — развитие кристаллических фаз. Содержание кристаллических фаз к окончанию технологического процесса достигает порядка 95%, размеры оптимально развитых кристаллов составляют 0,05–1 мкм. Таким образом, ситаллы отличаются от стекол тем, что в основном имеют кристаллическое строение, а от керамики — значительно меньшим размером кристаллических зерен.

Кристаллизация стекла может быть обусловлена фотохимическими и каталитическими процессами. В первом случае центрами кристаллизации служат мельчайшие частицы металлов (серебра, золота, меди, алюминия и др.), выделяющиеся из соответствующих окислов, входящих в состав стекла, под влиянием облучения с последующей термообработкой для проявления изображения. Для инициирования фото-химической реакции обычно используют ультрафиолетовое излучение. При термообработке происходит образование и рост кристаллитов вокруг металлических частиц. Одновременно при проявлении материал приобретает определенную окраску. Стеклокристаллические материалы, получаемые таким способом, называют *фотоситаллами*.

Технология изготовления ситаллов упрощается, если в качестве катализаторов кристаллизации использовать соединения, ограниченно растворимые в стекломассе или легко кристаллизующиеся из расплава. К числу таких соединений относятся TiO_2, FeS, B_2O_3, Cr_2O_8, V_2O_6, фториды и фосфаты щелочных и щелочно-земельных металлов. При каталитической кристаллизации необходимость в предварительном облучении отпадает. Получаемые при этом стеклокристаллические материалы называют *термоситаллами*.

По техническому назначению ситаллы можно подразделить на установочные и конденсаторные. Установочные ситаллы широко используют в качестве подложек гибридных интегральных микросхем и дискретных пассивных элементов (например, тонкопленочные резисторы), деталей СВЧ-приборов и некоторых типов электронных ламп. Достоинством ситалловых конденсаторов являются повышенная электрическая прочность по сравнению с керамическими конденсаторами [3].

4.2.7 Керамика

Керамика — большая группа диэлектриков с различными свойствами, объединенные общностью технологического цикла.

Особенности технологического цикла. Любая технологическая схема керамического производства включает в себя:

1. Измельчение и смешивание исходных компонентов.

   Эта операция производится в шаровых и вибрационных мельницах. В качестве мелющих тел используют керамические или стальные шары различного диаметра. Мельницы

бывают как сухого, так и мокрого измельчения. Более тонкое измельчение достигается в водной среде.

2. Пластификация массы и образование формовочного полуфабриката. Полученная в мельнице смесь пластифицируется органическим пластификатором. Пластификаторы подразделяют на водорастворимые и расплавляемые. Наиболее часто используют поливиниловый спирт и парафин.
3. Формование заготовок. Формование осуществляется методом прессования, протяжкой через мундштук или горячим литьем под давлением. Крупногабаритные изделия сложной формы формуют путем литья жидкой керамической массы в гипсовые формы.
4. Спекание. Спекание изделий производят в туннельных электрических печах при температуре 1300°C и выше. При спекании происходит выжигание пластификатора, завершаются химические реакции между компонентами. За счет слияния частиц фиксируется форма изделия, материал приобретает необходимую механическую прочность и заданные физические и электрические свойства.

В процессе обжига вследствие испарения влаги, выгорания пластификатора и уплотнения материала происходит усадка изделий, т. е. уменьшение их размеров. В зависимости от состава измельченной смеси, количества пластификатора и режимов обжига усадка изменяется в широких пределах и может превышать 20%. Принимая во внимание это обстоятельство, необходимо при формовке заготовок давать им завышенные размеры. Заранее оценить усадку довольно трудно, поэтому допуски на размеры керамических изделий, особенно крупногабаритных, сравнительно велики (до 5% от линейного размера) [3].

Классификация керамики Керамику по техническому назначению можно подразделить на установочную керамику и конденсаторную керамику.

Установочная керамика. К установочной керамике относятся материалы, из которых изготовляются основания конденсаторов, разнообразные изоляторы, планки, панели, каркасы катушек, корпуса резисторов, подложки интегральных микросхем. Она должна иметь низкие потери, хорошие электроизоляционные свойства и прочность.

- Изоляторный фарфор — низкочастотный установочный материал. Изготавливается из специальных сортов глины, кварцевого песка и полевого шпата. Обладает низкой пористостью и высокой плотностью, водонепроницаемостью, довольно высокой электрической и механической прочностью. На высоких частотах использование затруднено из-за высоких диэлектрических потерь.

- Радиофарфор — занимает промежуточное положение между высокочастотными и низкочастотными диэлектриками. Улучшение свойств обусловлено вводом в состав исходной смеси окиси бария, резко снижающей диэлектрические потери.

- Ультрафарфор — высокочастотная керамика, дальнейшее усовершенствование радиофарфора, отличается повышенным содержанием глинозема($> 80\%$). Сочетает в себе низкие диэлектрические потери с высокой механической прочностью и удовлетворительными технологическими параметрами. Предназначен для установочных деталей и конденсаторов, к которым предъявляются повышенные требования.

- Алюминоксид — высокочастотная керамика, сочетающая низкие диэлектрические потери на радиочастотах, высокую нагревостойкость (до 1600°C), большую механическую прочность и хорошую теплопроводность (в $10\ldots20$ раз больше, чем у изоляторного фарфора). Высокая абразивность алюминоксида затрудняет его механическую обработку. Алюминоксид на $90\ldots95\%$ состоит из глинозема (Al_2O_3). Используется в качестве вакуумплотных изоляторов в корпусах полупроводниковых приборов и подложек интегральных микросхем.

- Поликор — разновидность алюминоксида. Прозрачен, поэтому его применяют для изготовления колб некоторых специальных источников света. Обладает высокой плотность, поэтому можно обеспечить высокую чистоту обработки поверхности. Вследствие этого поликор является ценным материалом для осаждения пассивных элементов гибридных интегральных схем.

- Брокерит — высокочастотная керамика на основе окиси бериллия (BeO). Обладает самой высокой теплопроводностью

среди неметаллических материалов. Применяется для изготовления подложек интегральных схем и в особо мощных приборах СВЧ. Недостатком данной кермаки является то, что порошок BeO токсичен, что требует соблюдения строгих мер техники безопасности.

- Цельзиановая керамика — состоит из цельзиана ($BaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}2\,SiO_2$), $BaCO_3$ и каолина ($Al_2O_3{\cdot}2\,SiO_2{\cdot}2\,H_2O$). Обладает низким температурным коэффициентом, повышенной электрической прочностью и низкими диэлектрическими потерями. Из недостатков можно выделить только сравнительно небольшую механическую прочность. Применяется при изготовлении каркасов высокостабильных индуктивных катушек.

- Стеатитовая керамика — высокочастотная керамика на основе талька ($3\,MgO{\cdot}4\,SiO_2{\cdot}H_2O$). Обладает малой абразивностью и незначительной усадкой при обжиге (1–1,5%), поэтому из нее можно изготавливать мелкие детали с высокой точностью в размерах. Стеатитовую керамику применяют в качестве опорных плат, изолирующих колец, деталей корпусов полупроводниковых приборов.

- Форстеритовая керамика — керамика на основе ортосиликата магния ($2\,MgO{\cdot}SiO_2$). Имеет небольшие диэлектрические потери, высокое значение удельного объемного сопротивления и хорошую механическую прочность, характеризуется повышенным коэффициентом линейного расширения, благодаря которому форстеритовую керамику применяют в электровакуумной технике как изолятор для согласованного спая с металлами [3].

Конденсаторная керамика. Конденсаторную керамику используют для производства высокочастотных и низкочастотных конденсаторов высокого и низкого напряжения. Основные требования, предъявляемые к этой керамике, — возможно более высокое значение диэлектрической проницаемости. Это позволяет снизить габариты конденсаторов и уменьшить их массу.

- Тиконды — специальная керамические материалы, используемая для высокочастотных конденсаторов, в состав которой входит титан. Среди тикондов можно выделить рутил (TiO_2), перовскит ($CaTiO_3$), титанат стронция ($SrTiO_3$).

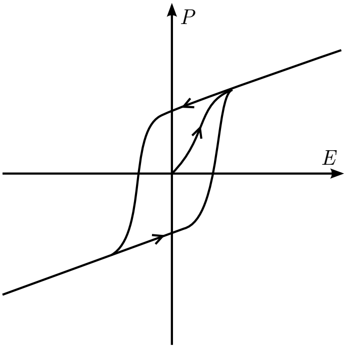


Рис. 4.4. Петля диэлектрического гистерезиса

- Термоскомпенсированные тиконды — к ним относятся титано-цирконивая керамика (твердые растворы TiO_2–ZrO_2), лантановая керамика ($LaAlO_3$–$CaTiO_3$) и станнатная керамика ($CaSnO_3$–$CaTiO_3$–$CaZrO_3$). Данная группа материалов отличается повышенной температурной стабильностью свойств, которой добиваются за счет снижения диэлектрической проницаемости. Соответственно из данной керамики изготавливают высокочастотные термостабильные конденсаторы.
- Сегнетокерамика — низкочастотная конденсаторная керамика ($BaTiO_3$, твердые растворы с сегнетоэлектрическими свойствами). Обладает весьма высокой диэлектрической проницаемостью ε, но не отличается температурной стабильностью.

Также в качестве конденсаторных материалов используют установочную керамику (ультрафарфор, стеатитовую и цельзиановую керамики) [3].

4.3 Активные диэлектрики

4.3.1 Сегнетоэлектрики

Сегнетоэлектрики. *Сегнетоэлектрики* — твердые диэлектрики (некоторые ионные кристаллы и пьезоэлектрики), обладающие в определенном интервале температур собственным электриче-

ским дипольным моментом, который может быть переориентирован за счет приложения внешнего электрического поля. Наличие явления гистерезиса по отношению к электрическому дипольному моменту дало второе название данных веществ — ферроэлектрики, которым пользуются в иностранной литературе.

Типичный представитель сегнетоэлектриков — сегнетова соль, двойная соль винной кислоты $KNaC_4H_4O_6 \cdot 4\,H_2O$; именно ее название лежит в основе термина «сегнетоэлектрик». Более простыми сегнетоэлектриками являются, например, титанат бария $BaTiO_3$ и титанат свинца $PbTiO_3$.

Температура, при которой исчезает спонтанная поляризация (то есть собственный дипольный момент) и происходит перестройка кристаллической структуры, носит название температуры (точки) Кюри (ещё одна аналогия с ферромагнетиками); переход через точку Кюри означает фазовый переход, а соответствующие фазы обозначаются как полярная (сегнетоэлектрик) и неполярная (параэлектрик — нелинейный диэлектрик, не обладающий спонтанной поляризацией, относительная диэлектрическая проницаемость которого уменьшается с ростом температуры).

Спонтанная поляризация в сегнетоэлектриках в точке Кюри меняется либо непрерывно (переход второго рода, сегнетова соль), либо скачком (переход первого рода, титанат бария). Другие характеристики сегнетоэлектриков, такие как диэлектрическая проницаемость, могут достигать в точке Кюри очень больших значений (10^4 и выше).

Отличительными чертами сегнетоэлектриков являются также высокие значения диэлектрической проницаемости, наличие пьезоэлектрического и пироэлектрического эффектов (но не все пьезо- и пироэлектрики являются сегнетоэлектриками), зависимость показателя преломления от величины приложенного электрического поля [3].

Применение сегнетоэлектриков. В техническом применении сегнетоэлектриков наметилось несколько направлений, важнейшими из которых следует считать:

1. изготовление малогабаритных низкочастотных конденсаторов с большой удельной емкостью;
2. использование материалов с большой нелинейностью поляризации для диэлектрических усилителей, модуляторов и других управляемых устройств;

3. использование сегнетоэлементов в счетно-вычислительной технике в качестве ячеек памяти;
4. использование кристаллов сегнето- и антисегнетоэлектриков для модуляции и преобразования лазерного излучения;
5. изготовление пьезоэлектрических и пироэлектрических преобразователей [3].

4.3.2 Пьезоэлектрики

Пьезоэлектрический эффект — эффект возникновения поляризации диэлектрика под действием механических напряжений (прямой пьезоэлектрический эффект — рис. 4.5, *а*). Существует и обратный пьезоэлектрический эффект — возникновение механических деформаций под действием электрического поля (рис. 4.5, *б*).

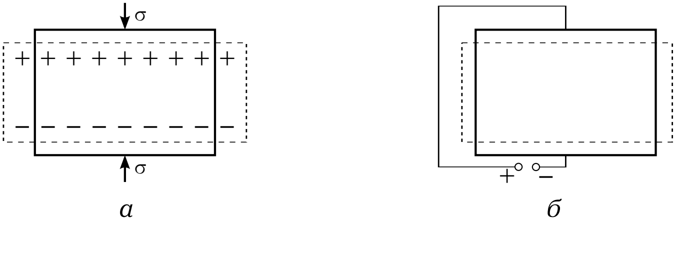
Пьезоэффект имеет линейный характер и в случае прямого пьезоэффекта описывается следующим выражением:

$$P = d \cdot \sigma,$$

где P — поляризованность, σ — механическое напряжение, возникающее в диэлектрике при упругом деформировании, d (Кл/Н) — пьезомодуль, являющийся коэффициентом пропорциональности, характеризующим способность диэлектрика к пьезоэффекту.

Для обратного пьезоэффекта между относительной упругой деформацией $\frac{l-l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l}$ и напряженностью электрического поля E существует следующая связь:

$$\frac{\Delta l}{l} = d \cdot E.$$



а *б*

Рис. 4.5. Пьезоэффект:
а — прямой, *б* — обратный

Физической причиной пьезоэффекта является асимметричное, упругое смещение зарядов в ионных или сильнополярных диэлектриках, в результате которого в структуре диэлектрика возникают диполи.

В качестве пьезодиэлектриков применяют:

- монокристаллический кварц ($d \sim 10^{-12}$ Кл/Н), который обладает пьезоэффектом в определенном кристаллографическом направлении, имеет высокую добротность (малые диэлектрические потери), поэтому применяется для создания резонаторов, обеспечивающих стабильность и точность частоты механических колебаний в электромеханических системах генераторов, фильтров, приборов времени;
- сегнетоэлектрики в виде однодоменных сегнетоэлектрических кристаллов $LiTaO_3$, $LiNbO_3$ ($d \sim 10^{-10}$ Кл/Н), имеющих более высокую, чем у кварца добротность в области высоких и сверхвысоких частот (10^{10} Гц);
- сегнетоэлектрическая керамика (пьезокерамика), например, твердые растворы $PbZrO_3$–$PbTiO_3$ (ЦТС) с большой остаточной поляризованностью, используется для ультразвуковых преобразователей электрических колебаний в механические (ультразвуковые излучатели для гидроакустики, дефектоскопии, механической обработки, громкоговорители, телефоны) и наоборот, механических колебаний в электрические (микрофоны, датчики давления, датчики деформации);
- полимерная пленка, в частности, поливинидиленфторид (CH_2–CF_2) ($d \sim 10^{-11}$ Кл/Н), используемая для различных датчиков давления и деформации, менее чувствительная, но более дешевая и технологичная, чем сегнетокерамика, позволяющая получать элементы с большой рабочей поверхностью [3].

4.3.3 Пироэлектрики

Пироэлектрики — кристаллические диэлектрики, сильно изменяющие поляризованность P при изменении температуры T. Количественно пироэффект характеризуется пироэлектрическим коэффициентом $p = -\frac{dP}{dT}$.

Пироэффект обратим, то есть изменение P также вызывает изменение T.

Физическая природа пироэлектричества связана с изменением спонтанной или остаточной поляризованности, поэтому имеет место, в первую очередь, у сегнетоэлектриков, которые в качестве пироэлектриков используют чаще всего. При этом, как и в случае сегнетоэлектрических пьезоэлектриков, для обеспечения пироэлектрических свойств производится поляризация кристаллов и керамики в сильном электрическом поле вблизи точки Кюри.

Среди сегнетоэлектрических кристаллов наибольшей стабильностью пироэлектрических свойств обладают кристаллы танталата и ниобата лития $LiTaO_3$, и $LiNbO_3$, а из керамик чаще всего используется керамика системы ЦТС.

Пленочные полимеры типа поливинидиленфторида имеют незначительную чувствительность, но используются благодаря дешевизне и простой технологии изготовления.

Пироэлектрики применяют как чувствительные элементы в приемниках оптического излучения в ИК-области и в датчиках температуры [3].

4.3.4 Электреты

Электретом называют тело из диэлектрика, длительно сохраняющее поляризацию и создающее в окружающем его пространстве электрическое поле, т. е. электрет является формальным аналогом постоянного магнита.

Классификация электретов по способу получения.

- Термоэлектреты (рис. 4.6, *а*) получают из охлажденного в сильном электрическом поле расплава полярных диэлектриков (канифоль, пальмовый воск). Способны сохранять поляризацию в течении многих месяцев и даже лет.
- Фотоэлектреты (рис. 4.6, *б*) изготавливают из материалов, обладающих фотоэлектропроводностью (сера, сульфид кадмия), при одновременном воздействии света и электрического поля. Длительно сохраняют заряды в темноте и разряжаются при освещении.
- Электроэлектреты (короноэлектреты) получают за счет появления заряженных дефектов в результате бомбардировки поверхности диэлектрика ионами, образовавшимися при газовом разряде в сильном электрическом поле (рис. 4.6, *в*).
- Радиоэлектреты (рис. 4.6, *г*) создают при помощи облучения

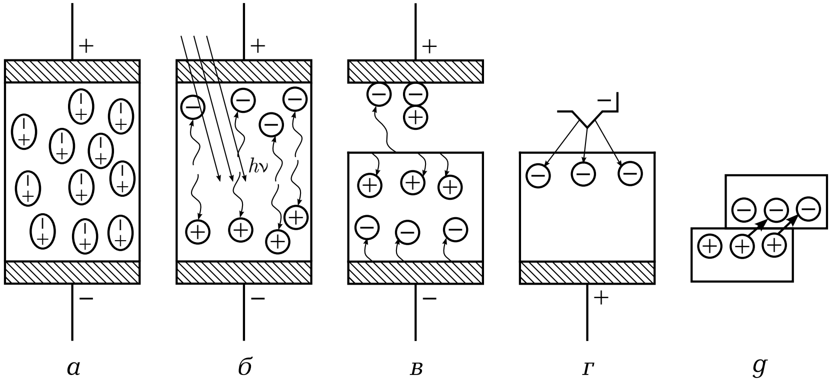


Рис. 4.6. Виды электретов:
а — термоэлектрет с остаточной поляризацией; *б* — фотоэлектрет; *в* — электроэлектрет; *г* — радиоэлектрет; *g* — трибоэлектрет

диэлектрика частицами высоких энергий.

- Трибоэлектреты (рис. 4.6, *g*) получают воздействуя на диэлектрик трением. Разрушение молекул при этом приводит к несимметричному расположению зарядов.

Электреты могут быть использованы для изготовления микрофонов и телефонов, измерения механических вибраций, в качестве пылеуловителей, дозиметров радиации, измерителей атмосферного давления и влажности, электрометров, в клавишных вычислительных машинах, в электрофотографии и во многих других случаях [3].

4.3.5 Пористый кремний

Пористый кремний — кремний, испещренный порами, то есть имеющий пористую структуру.

Традиционным способом получения пористого кремния является электрохимическое травление пластин монокристаллического кремния (c-Si) в этаноловом растворе плавиковой кислоты HF. При положительном потенциале на кремниевом электроде (аноде) протекают многоступенчатые реакции растворения и восстановления кремния. Вторым электродом (катодом) обычно служит платиновая пластина. При подходящем выборе плотности элек-

трического тока на поверхности c-Si происходит формирование пористого слоя.

Важнейшей характеристикой пористого кремния, определяющей большинство его физических параметров, является степень пористости или пористость (П). Она определяется выражением:

$$П = \rho_{\text{Si}} - \frac{\rho_{\text{пор-Si}}}{\rho_{\text{Si}}},$$

где ρ_{Si} и $\rho_{\text{пор-Si}}$ — плотности монокристаллического и пористого кремния соответственно.

В настоящее время (2005 год) значения пористости могут варьироваться от 5 до 95%.

Применение пористого кремния:

- Создание толстых диэлектрических пленок. Для создания кремниевых приборов, работающих при высоких напряжениях, существует необходимость в толстых диэлектрических слоях толщиной более 10 мкм. Однако диэлектрические пленки SiO_2, получаемые окислением обычного кремния не могут быть толще нескольких микрон. Оказалось, что пористый кремний хорошо подходит для решения этой задачи. Если этот материал подвергнуть термическому окислению, то за счет развитой системы пор молекулы кислорода способны проникнуть на всю толщину пористого кремния и привести к полному его окислению.

  Оптимальными для этих целей являются слои с пористостью около 50%. Важно отметить, что процесс формирования диэлектрических пленок с использованием пористых слоев происходит при температурах более низких, чем при традиционном термическом окислении кремния.

- Буферные слои. Низкопористый кремний ($П < 30\%$) оказался эффективным буферным слоем при эпитаксии) монокристаллических пленок других полупроводников на кремнии. Основным условием выращивания качественных слоев является близость величин постоянных решеток кремния и наносимого материала. Однако можно выращивать слои с большим рассогласованием решеток, если использовать промежуточные (буферные) слои. Использование буферного слоя пористого кремния позволило решить задачу выращивания качественных пленок полупроводников GaAs, PbS,

PbTe и др. при выращивании структур на подложке кремния.

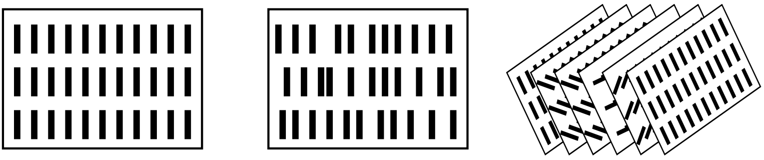
- Создание светоизлучающих приборов. Основной интерес к пористому кремнию вызван его способностью эффективно, в отличие от монокристаллического кремния излучать свет в видимом диапазоне. Это может быть использовано для создания значительно более дешевых светоизлучающих устройств (светодиодов, плоских цветных дисплеев).
- Создание световодов. Для целей интегральной оптики применяются планарные световоды, представляющие собой пленочную структуру, в которой свет распространяется в слое с высоким показателем преломления, ограниченном с двух сторон слоями с меньшим показателем преломления (эффект полного внутреннего отражения). Для пористого кремния этот показатель зависит от пористости (чем больше пористость, тем меньше показатель преломления), и поэтому формирование многослойных структур с разной пористостью позволяет получать на их основе волноводные элементы с низким уровнем потерь.
- Выращивание наноразмерных структур. В пористом кремнии в ходе электрохимического травления возможно получать квантовые точки, квантовые нити, элементы с различной фрактальной размерностью. Поэтому пористый кремний с $\Pi > 50\%$ следует рассматривать как один из материалов наноэлектроники. Более того, перспективным может оказаться заполнение пор другими химическими соединениями, что даст возможность формировать дополнительные низкоразмерные элементы в объеме пористого кремния [5].

4.3.6 Жидкие кристаллы

Жидкие кристаллы (ЖК) обладают, с одной стороны, текучестью, способностью находится в каплевидном состоянии, а с другой — для них характерна анизотропия свойств и, прежде всего, оптическая анизотропия.

Силы, обеспечивающие упорядоченную структуру жидкого кристалла, слабы, поэтому свойства ЖК сильно зависят от внешних факторов.

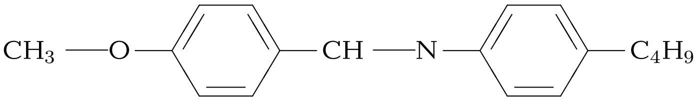
Жидкокристаллическое состояние образуют в основном органические соединения с палочкообразной формой молекул. При-



а *б* *в*

Рис. 4.7. Схематическое изображение строения жидких кристаллов: *а* — смектическое, *б* — нематическое, *в* — холестическое

мером такого вещества служит p-метоксибензилиден-p'-n-бутиланилин (МББА):



По признаку общей симметрии все жидкие кристаллы делятся на три вида: смектические, нематические и холестерические. [3]

Смектическая фаза. Смектическая фаза характеризуется слоистым строением (рис. 4.7, *а*). Центры тяжести удлиненных молекул находятся в плоскостях, равноудаленных друг от друга. В каждом слое молекулы ориентированы параллельно друг другу. Текучесть обеспечивается взаимным скольжением слоев, что обуславливает высокую вязкость. Из-за высокой вязкости смектические ЖК не получили широкого распространения в технике. [3]

Нематическая фаза. В данной фазе длинные оси молекул ориентированы вдоль одного общего направления — *нематического директора*. Однако центры тяжести расположены беспорядочно, поэтому порядок симметрии ниже, чем у смектических ЖК (рис. 4.7, *б*). В нематической фазе возможно взаимное скольжение молекул вдоль нематического директора. [3]

Для управления световым лучом и для визуального отображения информации интересны нематические ЖК. Объем нематического жидкого кристалла разбивается на домены, различающиеся направлением преимущественной ориентации, вследствие чего возникает оптическая неоднородность среды и наблюдается силь-

ное рассеяние света. Различают *гомогенную* (горизонтальную) и *гомеотропную* ориентации молекул относительно подложек.

Рассмотрим конструкцию электрооптической ячейки на жидких кристаллах (рис. 4.8). Между стеклянными пластинами, разделенными диэлектрическими прокладками, находитя слой ЖК (5–30 мкм). На внутренние поверхности нанесены управляющие электроды. Ячейка может работает как на просвет (рис. 4.8, *а*), так и на отражение (рис. 4.8, *б*), но тогда один из электродов выполняют непрозрачным.

Динамическое рассеяние света наблюдается в жидких кристаллах с отрицательной диэлектрической анизотропией и невысоким (порядка 10^6 Ом·м) удельным сопротивлением. При гомеотропной ориентации, ячейка прозрачна для падающего света. При приложении напряжения происходит поворот диполей, ориентация изменяется на гомогенную.

Для наблюдения полевых электрооптических эффектов используют нематические ЖК с повышенным (не менее 10^9 Ом·м) удельным сопротивлением. В этом случае можно подавить вихревые потомки жидкости, вызываемые ионной электропроводностью.

Соответствующей обработкой подложек добиваются гомогенной ориентации молекул с закручиванием текстуры по азимуту на 90°. В результате слой ЖК получает способность поворачивать плоскость поляризации входящего света на четверть оборота.

При наложении внешнего электрического поля, за счет положительной диэлектрической анизотропии происходит раскручивание спиральной структуры и ориентация молекулярных осей по направлению поля. При гомеотропной ориентации молекул способность поворачивать плоскость поляризации исчезает, поскольку свет распространяется вдоль оптической оси. Помещая на входе и выходе поляризатор и анализатор, преобразуют модуляцию поляризации света в амплитудную. Изменением напряжения на электродах можно регулировать светопропускание оптической ячейки, т. е. интенсивность выходящего света. Для получения цветных изображений в ЖК вводят молекулы красителя.

К преимуществам индикаторов на ЖК относятся:

- хороший контраст при ярком освещении;
- низкая потребляемая мощность;
- совместимость с интегральными схемами по рабочим пара-

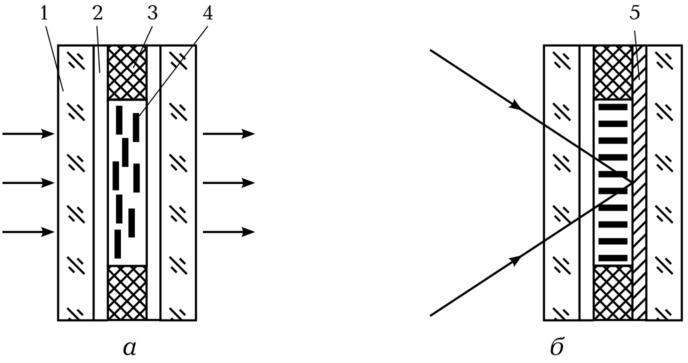


Рис. 4.8. Электрооптическая ЖК-ячейка: *а* — работа на просвет (гомогенная ориентация молекул), *б* — работа на отражение (гомеотропная ориентация молекул), 1 — стеклянные подложки, 2 — прозрачные электроды, 3 — диэлектрические прокладки, 4 — жидкий кристалл, 5 — непрозрачный (отражающий) электрод

метрам и конструкции;

- сравнительная простота изготовления и низкая стоимость.

Недостатками устройств на ЖК являются невысокое быстродействие, а также подверженность процессам электро- и фотохимического старения. [3]

Холестическая фаза. Холестическая фаза похожа на нематическую, но ее структура дополнительно закручена вокруг оси, перпендикулярной молекулярным осям. В результате получается слоистая винтовая структура, с шагом спирали порядка 300 нм.

Световые лучи, проходящие сквозь такую структуру испытывают селективные отражения. Если плоский слой холестерического ЖК освещать белым светом, то в отраженном свете он будет казаться окрашенным, причем окраска может изменяться в зависимости от угла наблюдения.

Шаг винтовой спирали зависит от внешних воздействий, в частности от температуры. Это позволяет изготавливать цветовой термометр. [3]

4.4 Тонкие диэлектрические пленки

В современной микроэлектронике широко используются различные виды тонких диэлектрических пленок. Наиболее широко

применяются тонкие пленки SiO_2, Si_3N_4 и тонкие пленки поликристаллического кремния (которые, строго говоря, не являются диэлектрическими, но методы их получения аналогичны методам получения тонких пленок SiO_2 и Si_3N_4 (см. раздел 3.6). Рассмотрим их поподробнее.

Диоксид кремния SiO_2. Чаще всего применяется в качестве подзатворного диэлектрика. Наиболее распространенным способом получения тонких пленок SiO2 является термическое окисление. Слой двуокиси кремния формируется на кремниевой пластине за счет химического взаимодействия в приповерхностной области полупроводника атомов кремния и кислорода. Кислород содержится в окислительной среде, с которой контактирует поверхность кремниевой подложки, нагретой в печи до температуры $T = 900$–$1200°C$. Однако в настоящее время толщина подзатворных диэлектриков снизилась более чем на порядок и приблизилась к 5–10 нм. Сформировать такие окислы обычным термическим окислением сложно, т. к. процессы нагрева и охлаждения полупроводниковых пластин в диффузионных печах очень инерционны, что не позволяет точно контролировать технологические режимы окисления и, следовательно, приводит к разбросу электрофизических параметров полупроводниковых структур. Поэтому тонкие (10–20 нм) и ультратонкие (менее 10 нм) окислы формируются методом быстрой термической обработки (БТО).

Особенностью этого метода является быстрый нагрев и охлаждение подложек с использованием некогерентных источников света. Обработка полупроводниковых пластин осуществляется в режиме теплового баланса с длительностью нагрева от единиц до десятков секунд. Существенным достоинством технологии БТО является возможность отслеживать процесс окисления в реальном режиме времени с точностью до долей секунды.

Но и это не решает всех проблем. При дальнейшей миниатюризации микросхем на основе SiO_2 возникает проблема: при толщине подзатворного диэлектрика меньше 1 нм токи утечки возрастают экспоненциально. Для преодоления этого ограничения предлагается использовать в качестве подзатворного диэлектрика диоксид гафния HfO_2, а также другие диэлектрики с высокой диэлектрической проницаемостью ε (high-k диэлектрики). Преимуществами HfO_2 являются: относительно высокая константа диэлектрической проницаемости ($k = 14$–25) при большой ширине запрещенной зоны ($\Delta Э = 8$–$5{,}7$ эВ) и термодинамически стабильная граница раздела с кремнием [5].

Нитрид кремния Si_3N_4. Наряду с защитными диэлектрическими пленками диоксида кремния в производстве полупроводниковых приборов и интегральных микросхем все более широкое применение находят пленки нитрида кремния. Пленки нитрида кремния обладают меньшей проницаемостью для диффузантов, используемых в обычной планарной технологии, чем пленки диоксида кремния. Поэтому пленки нитрида кремния получают более тонкими. Это является важным фактором для фотолитографии, способствующим увеличению ее разрешающей способности. Пленки нитрида кремния можно выращивать во много раз быстрее, чем пленки диоксида кремния, и при более низких температурах. Их можно выращивать различными способами:

- реакцией взаимодействия кремния с азотом (или аммиаком);
- реакцией взаимодействия силана (SiH_4) с аммиаком;
- методом открытой трубы;
- методом реактивного катодного осаждения;
- и другие способы.

Нитрид кремния используется в микроэлектронике для маскирования поверхности кремниевой подложки при проведении процессов локальной диффузии, локального окисления, локального травления, а также для защиты готовых структур от окружающей среды [5].

Поликристаллический кремний. Пленки поликристаллического кремния применяются при изготовлении тонкопленочных транзисторов (в качестве материала затвора), солнечных элементов, сенсоров.

Приложение A

Справочные таблицы

Таблица А.1. Свойства металлов.

Металл	Тип кристалличекой структуры	Период решетки, нм		Плотность, Мг/м^3	Температура плавления, °C	Удельная тепло-проводность, Вт/(м • К)	Температурный коэф. линей-ного расширения, $\alpha_l \cdot 10^6$, К$^{-1}$	Удельное сопротивление, $\rho \cdot 10^8$, Ом • м	Температурный коэф. удель-ного сопротивления, $\alpha_\rho \cdot 10^3$, К$^{-1}$	Работа выхода электронов, эВ	Абсолютная удельная термо – ЭДС, мкВ/К	Магнитное состояние
		a	c									
Al	Г. ц. к.	0,404	—	2,71	660	218	21	2,65	4,1	4,25	−1,3	П
V	О. ц. к.	0,303	—	6,11	1919	31	8,3	22,6	3,6	4,12	+0,9	П
Bi	Ромбоэдр.	0,474	$\alpha = 57°41'$	9,80	271	8,4	13,4	1,07	4,2	4,4	−75,0	Д
W	О. ц. к.	0,316	—	19,25	3420	154	5,5	5,6	5,0	4,54	+2,0	П
Ga	Ромбич.	0,453	0,766	5,91	29,8	29,3	18	40,1	3,9	3,96	—	Д
Fe	О. ц. к.	0,286	—	7,87	1539	74	11,7	9,7	6,6	4,31	+16,6	Ф769
Au	Г. ц. к.	0,407	—	19,32	1046	311	14,2	2,25	3,9	4,3	+1,5	Д
In	Тетраг.	0,458	0,494	7,31	156,8	85	33	8,4	4,9	3,8	—	Д
Ir	Г. ц. к.	0,384	0,495	22,65	2447	146	6,5	5,4	4,1	4,7	+1,0	П
Cd	Гекс.	0,296	0,563	8,65	321	97,6	29	7,6	4,0	4,1	+2,1	Д
Co	Гекс.	0,251	0,409	8,84	1494	70	13,4	4,3	6,0	4,4	+20,1	Ф1131
Mg	Гекс.	0,321	0,530	1,74	651	167	26	4,5	2,6	3,64	+4,5	П
Cu	Г. ц. к.	0,361	—	8,93	1084	406	16,6	1,68	4,3	4,4	+1,5	Д
Mo	О. ц. к.	0,315	—	10,22	2620	147	6,0	5,2	4,3	4,3	+6,3	П
Na	О. ц. к.	0,428	—	1,01	98	132	72	4,3	5,5	2,35	−8,7	П
Ni	Г. ц. к.	0,352	—	8,91	1455	88,5	13,5	6,8	6,7	4,50	−19,3	Ф358
Nb	О. ц. к.	0,330	—	8,58	2469	53,2	7,1	15,0	4,0	3,99	−0,7	П

Продолжение таблицы А.1.

Металл	Тип кристалличекой структуры	Период решетки, нм		Плотность, Мг/м³	Температура плавления, °C	Удельная теплопроводность, Вт/(м • К)	Температурный коэф. линейного расширения, $\alpha_l \cdot 10^6$, К$^{-1}$	Удельное сопротивление, $\rho \cdot 10^8$, Ом • м	Температурный коэф. удельного сопротивления, $\alpha_\rho \cdot 10^3$, К$^{-1}$	Работа выхода электронов, эВ	Абсолютная удельная термо−ЭДС, мкВ/К	Магнитное состояние
		a	c									
Sn	Тетраг.	0,583	0,318	7,29	232	65	26,2	11,3	4,5	4,38	−1,1	П
Pd	Г. ц. к.	0,388	—	12,02	1554	76,2	12,5	10,2	3,8	4,8	−10,3	П
Pt	Г. ц. к.	0,392	—	21,47	1772	76	9,0	9,8	3,9	5,32	−5,1	П
Re	Гекс.	0,276	0,446	21,03	3190	70	6,6	17,2	3,5	5,0	−7,5	П
Rh	Г. ц. к.	0,380	—	12,42	1963	152	8,5	3,94	4,6	4,75	+1,6	П
Hg	Ромбоэдр.	0,346	0,671	13,5**	−39	7,9**	182**	94,7**	0,9**	4,52**	+8,1**	Д
Rb	О. ц. к.	0,570	—	1,53	39,5	35,6	90	11,3	4,7	2,13	−8,2	П
Pb	Г. ц. к.	0,495	—	11,34	327	35,0	28,5	19	4,2	4,0	−1,2	Д
Ag	Г. ц. к.	0,409	—	10,50	962	453	18,8	1,50	4,1	4,3	+1,5	Д
Ta	О. ц. к.	0,331	—	16,66	2996	45,2	6,6	12,4	3,2	4,12	−2,5	П
Ti	Гекс.	0,295	0,468	4,51	1670	22	9,2	47	3,0	3,95	+4,5	П
Th	Г. ц. к.	0,509	—	11,72	1750	35,3	11,3	13	3,3	3,36	−3,0	П
Cr	О. ц. к.	0,288	—	7,19	1890	89	4,4	15	3,0	4,48	+18	А38
Cs	О. ц. к.	0,614	—	1,90	28,5	18,4	97	18,3	5,0	1,81	+0,2	П
Zn	Гекс.	0,266	0,495	7,13	419,5	113	39,7	5,45	4,2	4,24	+1,5	Д
Zr	Гекс.	0,323	0,515	6,51	1885	29,5	5,9	41	4,4	4,0	+5,2	П

Примечания: * — $b = 0{,}452$ нм; ** — параметры даны для жидкого состояния; Д — диамагнетик; П — парамагнетик; Ф — ферромагнетик; А — антиферромагнетик, цифра указывает температуру Кюри; г. ц. к. — гранецентрированная кубическая; о. ц. к. — объемноцентрированная кубическая.

Таблица А.2. Свойства полупроводниковых материалов.

Полупроводник	$Z_{ср}$	Тип кристаллической структуры	Период решетки ×10, нм		Плотность, Мг/м³	Температура плавления, °С	Удельная тепло-проводность, Вт/(м·К)	Температурный коэффициент линейного расширения, $К^{-1}$	Структура энергетических зон	Ширина запрещенной зоны, эВ	Изменение запрещенной зоны, d(Δ Э)/dT×10⁴, эВ/К	Подвижность, м²/(В·с)		Статическая диэлектрическая проницаемость	Высокочастотная диэлектрическая проницаемость	Показатель преломления при hν=ΔЭ
			a	*c*								электронов	дырок			
Si	—	Ал	5,4307	—	2,33	1414	150	2,6	Непр.	1,12	−2,84	1500	480	11,9	—	3,44
Ge	—	Ал	5,6575	—	5,327	937	60	5,8	Непр.	0,67	−3,9	3900	1900	16,0	—	4,00
C	—	Ал	3,567	—	3,52	4300	—	3,2	Непр.	5,47	—	1800	1200	5,7	—	2,42
SiC	10	Сф	4,3596	—	3,215	2830	500	3,28	Непр.	2,39	−5,8	1000	60	9,72	6,52	2,68
SiC	10	Гекс	3,0809	—	3,216	2830	500	2,48	Непр.	3,02	−5,5	360	60	10,0	6,70	2,75
BN	6	Сф	3,615	—	3,49	3000	500	3,5	Непр.	7,5	—	—	—	7,1	4,5	2,1
BN	6	Гекс	2,504	—	2,26	2700	80	—	Пр.	3,85	—	—	—	4,15	3,25	2,2
AlN	10	В	3,111	—	3,26	2400	200	4,8	Пр.	5,88	—	80	14	8,5	4,8	2,2
GaN	19	В	3,189	—	6,11	1700	130	4,4	Пр.	3,40	−6,0	440	30	9,0	5,35	2,3
InN	28	В	3,533	—	6,88	1100	80	3,5	Пр.	1,6	−8,3	50	—	15,0	8,4	2,9
AlP	14	Сф	5,4636	—	2,37	2000	90	4,2	Непр.	2,45	−3,5	80	30	9,9	7,6	3,0
GaP	23	Сф	5,4509	—	4,13	1467	110	5,9	Непр.	2,27	−4,7	190	120	11,1	9,1	3,45
InP	32	Сф	5,8688	—	4,78	1070	67	4,6	Пр.	1,351	−2,8	4600	150	12,4	9,5	3,45
AlAs	23	Сф	5,6605	—	3,60	1770	8	5,2	Непр.	2,168	−4,0	280	—	10,1	8,16	3,5
GaAs	32	Сф	5,6532	—	5,32	1238	46	6,4	Пр.	1,424	−4,0	9500	450	13,1	10,4	3,65
InAs	41	Сф	6,0584	—	5,67	942	26	5,3	Пр.	0,360	−3,5	33000	460	14,6	11,8	3,52

Продолжение таблицы А.2.

Полупроводник	$Z_{ср}$	Тип кристаллической структуры	Период решетки ×10, нм		Плотность, Мг/м^3	Температура плавления, °С	Удельная тепло-проводность, Вт/(м·К)	Температурный коэф. линейного расширения, К$^{-1}$	Структура энергетических зон	Ширина запрещенной зоны, эВ	Изменение запрещенной зоны, d(ΔЭ)/dT×10^4, эВ/К	Подвижность, м^2/(В·с)		Статическая диэлектрическая проницаемость	Высокочастотная диэлектрическая проницаемость	Показатель преломления при hν=ΔЭ
			a	c								электронов	дырок			
AlSb	32	Сф	6,1355	—	4,28	1065	56	4,2	Непр.	1,61	−3,5	200	550	12,0	10,2	3,4
GaSb	41	Сф	6,0959	—	5,61	712	35	6,2	Пр.	0,726	−3,7	4000	1400	15,7	14,4	3,82
InSb	50	Сф	6,4794	—	5,78	525	18	4,9	Пр.	0,172	−3,0	78000	750	17,7	15,7	3,96
BeO	6	В	2,69	4,39	3,03	2550	300	5,2	Пр.	6,0	—	—	—	—	—	1,71
ZnO	19	В	3,253	5,213	5,68	2300	30	5,4	Пр.	3,43	—	200	180	8,75	3,75	1,96
ZnS	23	Сф	3,822	6,260	4,09	1830	16	6,2	Пр.	3,74	−3,8	140	100	9,6	5,4	2,4
ZnS	23	В	5,4102	—	4,10	1020*	16	6,14	Пр.	3,68	−5,2	280	—	8,3	5,4	2,4
CdS	32	Сф	4,136	6,714	4,82	1750	20	5,4	Пр.	2,48	−5,0	300	50	8,8	5,3	2,5
HgS	48	Сф	5,850	—	7,73	1480	—	20	Пр.	2,0	—	700	—	31,0	—	—
ZnSe	32	В	5,6687	—	5,26	1520	19	7,14	Пр.	2,70	−4,5	600	28	8,1	5,4	2,89
CdSe	41	Сф	4,299	7,011	5,81	1264	4,5	4,3	Пр.	1,75	−4,6	900	50	9,7	6,2	—
HgSe	57	Сф	6,084	—	8,25	790	2,0	1,8	Пр.	0,6	—	20000	—	26,0	—	—
ZnTe	41	Сф	6,1033	—	5,63	1295	20	8,3	Пр.	2,28	−4,1	530	30	9,67	7,28	—
CdTe	50	Сф	6,4834	—	5,86	1098	6,5	6,2	Пр.	1,51	−4,1	1200	60	10,2	7,1	—
HgTe	66	NaCl	6,463	—	8,09	670	2,2	6,8	Пр.	0,02	5,0	25000	200	48,0	—	3,8
PbS	49	NaCl	5,936	—	7,61	1078	144	19,4	Пр.	0,41	4,2	600	700	180,0	20	4,1
PbSe	58	NaCl	6,124	—	8,15	1065	94	19,4	Пр.	0,28	4,0	1200	1000	227,0	24	4,6
PbTe	67	NaCl	6,462	—	8,16	920	115	19,8	Пр.	0,32	4,3	1800	900	428,0	35	5,3

Примечания: Ал — алмаз; Сф — сфалерит; В — вюрцит; Гекс — гексагональная; * — температура фазового перехода.

Таблица А.3. Свойства диэлектрических материалов.

Материал	Плотность, $Мг/м^3$	Диэлектрическая проницаемость	Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости, $\alpha_l \cdot 10^6$, $К^{-1}$	Удельное объемное сопротивление, Ом · м	Тангенс угла диэлектрических потерь, при $f = 1$ МГц	Электрическая прочность, МВ/м	Примечание
Полиэтилен	0,92 ... 0,97	2,2 ... 2,4	−(200 ... 300)	$10^{14} \dots 10^{15}$	$(2 \dots 4) \cdot 10^{-4}$	40 ... 150*	Нагревостойкость 90 ... 105°C
Полипропилен	0,92 ... 0,93	2,0	−(200 ... 300)	$10^{12} \dots 10^{15}$	$(3 \dots 5) \cdot 10^{-4}$	30 ... 130*	Нагревостойкость 105°C
Полистирол	1,05 ... 1,10	2,5 ... 2,6	−(150 ... 200)	$10^{14} \dots 10^{15}$	$(2 \dots 3) \cdot 10^{-4}$	20 ... 110*	Нагревостойкость 75°C
Политетрафторэтилен	2,15 ... 2,2	1,9 ... 2,2	−(150 ... 300)	$10^{14} \dots 10^{15}$	$(2 \dots 3) \cdot 10^{-4}$	40 ... 250*	Нагревостойкость 300°C
Поливинилхлорид	1,2 ... 1,3	3,4 ... 3,5	—	$10^{9} \dots 10^{13}$	0,01 ... 0,05	20 ... 50	Нагревостойкость 60 ... 80°C
Полиэтилентерефталат	1,4	3,0 ... 3,5	400 ... 600	$10^{12} \dots 10^{14}$	$(2 \dots 20) \cdot 10^{-4}$	20 ... 180*	Прочность при растяжении до 200 МПа
Поликарбонаты	1,17 ... 1,22	3,0 ... 3,2	50 ... 100	$10^{14} \dots 10^{15}$	$(2 \dots 60) \cdot 10^{-3}$	30 ... 150*	Холодостойкость ниже −100°C
Поливинилиденфторид	1,76	6,6	—	10^{12}	0,17	40	Обладает пьезосвойствами
Полиметилметакрилат	1,18 ... 1,19	3,6	—	$10^{10} \dots 10^{11}$	0,01 ... 0,02	15 ... 25	Прочность при изгибе 100 МПа
Полиамиды (капрон)	1,13 ... 1,16	4 ... 6	—	$10^{11} \dots 10^{12}$	0,02 ... 0,1	20 ... 25	Прочность волокон при растяжении до 400 МПа

Продолжение таблицы А.3.

Материал	Плотность, $Мг/м^3$	Диэлектри ческая проница- емость	Температур- ный коэффи- циент диэлек- трической проница- емости, $\alpha_l \cdot 10^6$, $К^{-1}$	Удельное объемное сопротивле- ние, Ом · м	Тангенс угла диэлектри- ческих потерь, при $f = 1$ МГц	Электри- ческая прочность, МВ/м	Примечание
Полиимиды	1,3 ... 1,5	3,5	—	$10^{15} \dots 10^{16}$	$(0{,}6 \dots 2) \cdot 10^{-3}$	30 ... 200*	Кратковременная нагревостойкость до 500°C
Полиуретаны	1,2	3 ... 4	—	$10^{12} \dots 10^{13}$	0,02 ... 0,03	20 ... 25	Стойкость к окислителям
Фенопласты	1,4 ... 2,0	4 ... 6	—	$10^{7} \dots 10^{12}$	0,01 ... 0,5	5 ... 17	Фенолформальдегидная смазка
Гетинакс	1,3 ... 1,4	6 ... 7	—	$10^{8} \dots 10^{11}$	0,04 ... 0,08	15 ... 30	Вдоль слоев свойства хуже
Стеклотекстолит	1,6 ... 1,8	5,5 ... 6	—	$10^{8} \dots 10^{11}$	0,02 ... 0,04	10 ... 16	Нагревостойкость 180 ... 300°C
Эпоксидные компаунды	1,2 ... 1,9	4 ... 6,5	—	$10^{12} \dots 10^{14}$	0,01 ... 0,02	20 ... 45	Возможно отверждение при 20°C
Слюда	2,6 ... 2,8	6 ... 8	10 ... 20	$10^{12} \dots 10^{14}$	$(1 \dots 6) \cdot 10^{-4}$	100 ... 250*	Вдоль слоев свойства хуже
Кварцевое стекло	2,2	3,8	—	$10^{14} \dots 10^{15}$	$(2 \dots 3) \cdot 10^{-4}$	40 ... 400*	Низкая теплопроводность
Щелочные силикатные стекла	2,2 ... 3,0	6 ... 11	3 ... 500	$10^{6} \dots 10^{10}$	$(2 \dots 7) \cdot 10^{-3}$	40 ... 400*	Допускают спай с металлами
Ситаллы	2,4 ... 2,8	5 ... 10	—	$10^{8} \dots 10^{12}$	$(1 \dots 80) \cdot 10^{-3}$	20 ... 85	Прочность при изгибе до 200 МПа

Продолжение таблицы А.3.

Материал	Плотность, Мг/м^3	Диэлектри ческая проница-емость	Температурный коэффициент диэлектрической проница-емости, $\alpha_l \cdot 10^6$, К$^{-1}$	Удельное объемное сопротивление, Ом · м	Тангенс угла диэлектрических потерь, при $f = 1$ МГц	Электрическая прочность, МВ/м	Примечание
Изоляторный фарфор	2,4 … 2,7	5 … 8	—	$10^9 \ldots 10^{11}$	0,02 … 0,03	25 … 85	Щелочные оксиды в стеклофазе
Ультрафарфор	3,2 … 3,4	8,0 … 8,	80 … 140	$10^{12} \ldots 10^{13}$	$(1 \ldots 10) \cdot 10^{-4}$	25 … 30	Не содержит щелочных добавок
Алюминоксид	3,9	8,5 … 9,5	100 … 120	$10^{13} \ldots 10^{15}$	$10^{14} \ldots 10^{15}$	25 … 30	Нагревостойкость до 1 600°C
Поликор	3,9	9	80 … 100	$10^{14} \ldots 10^{15}$	$(1 \ldots 2) \cdot 10^{-4}$	30 … 45	Оптически прозрачен
Брокерит	—	6 … 7	40 … 80	10^{16}	$(2 \ldots 3) \cdot 10^{-4}$	30 … 45	Тепловродоность до 250 Вт/(м · К)
Стеатитовая керамика	2,9 … 3,0	6 … 8	70 … 180	10^{16}	$(6 \ldots 8) \cdot 10^{-4}$	25 … 40	Малая усадка при обжиге
Рутиловая керамика	3,8	70 … 80	$-(70 \pm 100)$	$10^{13} \ldots 10^{15}$	$(4 \ldots 5) \cdot 10^{-4}$	10 … 20	Электрохимическое старение
Первоскитовая керамика	3,8	140 … 150	$-(1300 \pm 200)$	$10^{11} \ldots 10^{13}$	$(3 \ldots 4) \cdot 10^{-4}$	10 … 20	Электрохимическое старение
Сегнетокерамика	5 … 6	до 20 000	—	$10^9 \ldots 10^{11}$	0,05 … 0,3	4 … 10	Нелинейные свойства

* Верхние пределы электрической прочность указаны для тонких пленок.

I	II	III	IV	V	VI
1 H					
	4 Be	5 B	6 C	7 N	8 O
		13 Al	14 Si	15 P	16 S
		31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se
		49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te
		81 Tl	82 Pb	83 Bi	

Таблица А.4. Группы аморфных тел

	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA
2		5 B	6 C	7 N	
3		13 Al	14 Si	15 P	16 S
4	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se
5	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te
6	80 Hg				

Таблица А.5. Элементы, образующие полупроводниковые соединения.

Литература

1. *Беккер Я. М.* Материалы для микроэлектронных ЭВМ (физические свойства). — Ленинград: ЛИТМО, 1979. — 64 с.

2. *Марголин В. И., Жабрев В. А., Тупик В. А.* Физические основы микроэлектроники. — М.: Издательский центр «Академия», 2008. — 400 с.

3. *Пасынков В. В., Сорокин В. С.* Материалы электронной техники. — 6-е, стер. изд. — СПб.: Издательство «Лань», 2004. — 368 с.

4. *Сорокин В. С., Антипов Б. Л., Лазарева Н. П.* Материалы и элементы электронной техники. — М.: Издательский центр «Академия», 2006. — Т. 1. Проводники, полупроводники, диэлектрики. — 448 с.

5. *Горелик С. С., Дашевский М. Я.* Материаловедение полупроводников и диэлектриков. — М.: «МИССИС», 2003. — 480 с.

6. *Скворцов А. М.* Физика отказов и надежность больших интегральных схем. Учебное пособие. — Л.: ЛИТМО, 1987. — 99 с.

7. *Ткалич В. Л., Коробейников А. Г., Гатчин Ю. А.* Исследование концентраторов механических напряжений и микродеформаций элементной базы микро- и наноэлектроники // *Научно-технический вестник.* — 2006. — № 30. Фундаментальные и прикладные исследования информационных систем и технологий.

8. *Коробейников А. Г., Титов А. Н, Гатчин Ю. А.* Методы исследования характеристик оптических кристаллов калий-

гадолиниевого вольфрамата // *Известия ВУЗов. Приборостроение.* — 2006. — № 3. — С. 70–73.

9. *Титов А. Н., Гатчин Ю. А.* Выращивание, спектроскопия и эффективная перестраиваемая генерация кристаллов KYW:Yb:Tm вблизи 1,9 мкм // *Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО.* — 2006. — № 14. Информационные технологии, вычислительные и управляющие системы.

10. Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. — 3-е, перераб. изд. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр отд-ние, 1988. — Т. 3. — 728 с.

11. *Пасынков В. В., Чиркин Л. К.* Полупроводниковые приборы. — СПб.: «Лань», 2002.

12. *Булычев А. Л. и др.* Электронные приборы. — М.: Лайт Лтд., 2000. — 200 с.

В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена Программа развития государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики» на 2009–2018 годы.

Кафедра проектирования компьютерных систем

1945–1966 РЛПУ (кафедра радиолокационных приборов и устройств). Решением Советского правительства в августе 1945 г. в ЛИТМО был открыт факультет электроприборостроения. Приказом по институту от 17 сентября 1945 г. на этом факультете была организована кафедра радиолокационных приборов и устройств, которая стала готовить инженеров, специализирующихся в новых направлениях радиоэлектронной техники, таких как радиолокация, радиоуправление, теленаведение и др. Организатором и первым заведующим кафедрой был д. т. н., профессор С. И. Зилитинкевич (до 1951 г.). Выпускникам кафедры присваивалась квалификация инженер-радиомеханик, а с 1956 г. — радиоинженер (специальность 0705).

В разные годы кафедрой заведовали доцент Б. С. Мишин, доцент И. П. Захаров, доцент А. Н. Иванов.

1966–1970 КиПРЭА (кафедра конструирования и производства радиоэлектронной аппаратуры). Каждый учебный план специальности 0705 коренным образом отличался от предыдущих планов радиотехнической специальности своей четко выраженной конструкторско-технологической направленностью. Оканчи-

вающим институт по этой специальности присваивалась квалификация инженер-конструктор-технолог РЭА.

Заведовал кафедрой доцент А. Н. Иванов.

1970–1988 КиПЭВА (кафедра конструирования и производства электронной вычислительной аппаратуры). Бурное развитие электронной вычислительной техники и внедрение ее во все отрасли народного хозяйства потребовали от отечественной радиоэлектронной промышленности решения новых ответственных задач. Кафедра стала готовить инженеров по специальности 0648. Подготовка проводилась по двум направлениям — автоматизация конструирования ЭВА и технология микроэлектронных устройств ЭВА.

Заведовали кафедрой: д. т. н., проф. В. В. Новиков (до 1976 г.), затем проф. Г. А. Петухов.

1988–1997 МАП (кафедра микроэлектроники и автоматизации проектирования). Кафедра выпускала инженеров, конструкторов, технологов по микроэлектронике и автоматизации проектирования вычислительных средств (специальность 2205). Выпускники этой кафедры имеют хорошую технологическую подготовку и успешно работают как в производстве полупроводниковых интегральных микросхем, так и при их проектировании, используя современные методы автоматизации проектирования. Инженеры специальности 2205 требуются микроэлектронной промышленности и предприятиям-разработчикам вычислительных систем.

Кафедрой с 1988 г. по 1992 г. руководил проф. С. А. Арустамов, затем снова проф. Г. А. Петухов.

С 1997 ПКС (кафедра проектирования компьютерных систем). Кафедра выпускает инженеров по специальности 210202 «Проектирование и технология электронно-вычислительных средств». Область профессиональной деятельности выпускников включает в себя проектирование, конструирование и технологию электронных средств, отвечающих целям их функционирования, требованиям надежности, проекта и условиям эксплуатации. Кроме того, кафедра готовит специалистов по защите информации, специальность 090104 «Комплексная защита объектов информатизации». Объектами профессиональной деятельности специалиста по защите информации являются методы, средства и системы обеспечения защиты информации на объектах информатизации.

С 1996 г. кафедрой заведует д. т. н., профессор Ю. А. Гатчин. За время своего существования кафедра выпустила 4364 инженеров.

На кафедре защищено 65 кандидатских и семь докторских диссертаций.

На кафедре проектирования компьютерных систем осуществляется магистерская подготовка по направлению 210200.05 — «Информационные технологии проектирования электронных средств».

Кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии

Кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии, в прошлом кафедра часового производства и приборов точной механики, была создана одновременно с основанием университета, который ведет свою историю от образования в 1900 г. ремесленного училища цесаревича Николая. Основателем кафедры является Норберт Болеславович Завадский — первый заведующий механико-оптического отделения этого училища.

В 1920 г. после революции механико-оптическое отделение было реорганизовано в техникум точной механики и оптики, который с 1925 г. начал подготовку инженеров-приборостроителей. В дальнейшем техникум был преобразован и уже в 1933 г. стал институтом точной механики и оптики. В течение этого времени кафедрой заведовал профессор Н. Б. Завадский.

В 1930 кафедра получила название Приборов точной механики, и ее возглавил Лаврентий Павлович Шишелов. В этот период времени на кафедре читались дисциплины «Теория часовых механизмов», «Электроизмерительные приборы» и «Механические приборы». В 1935 г. из состава кафедры выделилось направление гироскопических устройств и навигационных приборов. В 1940 г. на кафедре защитил кандидатскую диссертацию Захар Маркович Аксельрод, впоследствии доктор технических наук, возглавлявший кафедру во время войны.

После войны кафедра приборов точной механики выпускала специалистов по часовому производству и производству точного мерительного инструмента. На кафедре читались курсы «Приборы времени», «Теория и проектирование приборов времени», «Приборы для измерения малых промежутков времени», «Приборы для измерения скоростей и ускорений», «Тахометры», «Основы конструирования приборов точной механики».

В 1976 г. кафедру возглавил профессор Борис Александрович Арефьев, известный специалист в области автоматического

управления и газовых опор. В это время на кафедре производилась подготовка специалистов по специальности «Приборы точной механики» со специализациями «Приборы времени», «Приборы для измерения длин и углов» и «Приборы контроля размеров».

С 1985 года кафедрой заведовал основатель магниторезонансного класса изображений профессор Владислав Александрович Иванов. В связи с развитием техники и потребностью в выпуске инженерных кадров по разработке и эксплуатации магнитно-резонансных томографов с 1992 года кафедра начала подготовку инженеров по специализации «Компьютерная томография» и была переименована в кафедру Измерительных технологий и компьютерной томографии.

С 2005 г. кафедру возглавляет доктор технических наук, профессор Мария Яковлевна Марусина, являющаяся председателем УМК по специальности 200101 «Приборостроение» УМО ВУЗов Российской Федерации по образованию в области приборостроения и оптотехники. На кафедре ведутся научно-исследовательские работы по следующим направлениям: теоретико-групповые методы анализа и синтеза информационно-измерительных систем, метрологическое обеспечение нанотехнологий, микромеханические приборы и системы, томографические методы диагностики объектов (МРТ, КТ, ПЭТ), разработка и создание ЯМР-томографа. Научно-исследовательская работа кафедры получила финансовую поддержку Российского фонда фундаментальных исследований (сотрудниками кафедры выиграно четыре конкурсные заявки на гранты РФФИ). В 2005 г. кафедра заняла III место по итогам конкурса ведущих научно-педагогических коллективов СПбГУ ИТМО.

В настоящее время кафедра проводит подготовку инженеров по направлениям:

- двухуровневая инженерная подготовка (бакалавр — 4 года и магистр — 2 года) по направлению 200100 «Приборостроение» по профилю «Приборостроение» со специализациями: «Приборостроение» (бакалавр), «Информационно-измерительные комплексы» (магистр), «Томографические методы диагностики» (магистр);
- специалист (5 лет) по специальности 200101 «Приборостроение» со специализациями: «Компьютерная томография», «Методы и средства измерения механических величин».

Кафедра имеет персональную страничку в интернете: `http://faculty.ifmo.ru/tomograph`.

Юрий Арменакович Гатчин
Вера Леонидовна Ткалич
Павел Александрович Камаев
Дмитрий Дмитриевич Симаков
Евгений Дмитриевич Хмелев

Материалы электронных средств
Учебное пособие

В авторской редакции
Компьютерная верстка П. А. Камаев
Редакционно-издательские отдел СПбГУ ИТМО
Зав. редакционно-издательским отделом Н. Ф. Гусарова
Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99
Подписано к печати
Заказ №
Тираж 100 экз.
Отпечатано на ризографе